



**Carlos Manuel  
Farinhas de Oliveira  
Rodrigues**

**Previsão de ventos locais em ambiente urbano  
conjugando CFD e redes neuronais**



**Carlos Manuel  
Farinhas de Oliveira  
Rodrigues**

**Previsão de ventos locais em ambiente urbano  
conjugando CFD e redes neuronais**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, realizada sob a orientação científica do Prof. Doutor Nelson Amadeu Dias Martins, Professor auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro.



## **o júri**

presidente

**Prof. Doutor Robertt Valente**

Professor Auxiliar, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Aveiro

**Prof. Doutora Ana Margarida Costa**

Professora Auxiliar, Departamento de Ambiente e Ordenamento, Universidade de Aveiro

**Prof. Doutor Nelson Martins**

Professor Auxiliar, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Aveiro

**Doutor António Araújo**

Assistente Convidado, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Aveiro



## **agradecimentos**

Gostaria de agradecer todo o apoio e compreensão por parte da minha família, nomeadamente o meu pai José Rodrigues, a minha mãe Fernanda Farinhas, os meus irmãos António Rodrigues, João Rodrigues e Ana Rodrigues. Gostaria também agradecer todo o apoio e compreensão nos momentos menos fáceis à minha companheira Lia Araújo.

Gostaria de agradecer aos meus colegas de Departamento, pela amizade e incentivo, nomeadamente ao João Oliveira, à Mónica Correia, ao Alexandre Cruz e ao Hugo Calisto.

Agradeço em particular aos meus Orientadores, Prof. Doutor Nelson Martins e ao Doutor António Araújo, por toda a colaboração, paciência, linhas de orientação, formação técnica e pessoal.



## palavras-chave

Previsão de vento, ambiente urbano, simulação em CFD, redes neuronais.

## resumo

No panorama energético mundial, a previsão de ventos locais em ambiente urbano tornou-se muito apetecível como fonte energética alternativa para consumo doméstico. Por isso, são particularmente desejáveis, sistemas que permitam, de uma forma simples, rápida e de baixo custo, a previsão de ventos em ambiente urbano.

Modelos empíricos têm sido aplicados, ainda que com algumas limitações, devido aos detalhes relacionados com a heterogeneidade do escoamento vento, no estudo deste fenómeno. Além destes, também modelos numéricos têm sido aplicados com bastante sucesso; estes modelos são, contudo, caros e morosos, não estando a sua correcta implementação ao alcance do eventual utilizador final. Assim, a presente tese pretende contribuir no sentido do desenvolvimento de um modelo que permita, de uma forma simples e rápida a previsão de ventos locais em ambiente urbano. É, portanto, o objectivo específico da presente tese demonstrar a eficácia da utilização de redes neuronais artificiais na previsão de ventos em cima dos topos de edifícios.

Resultados experimentais obtidos em túnel de vento de um modelo à escala laboratorial foram utilizados para validar o uso de uma ferramenta CFD (*Computational Fluid Dynamics*) para simular regimes de vento em ambiente urbano. Foi demonstrado que os resultados da simulação CFD eram aceitavelmente aproximados aos resultados experimentais do túnel de vento, particularmente para cotas superiores às alturas dos edifícios. No sentido da diminuição da complexidade do problema e da diminuição do esforço computacional, dado o enorme número de cenários possíveis de simular a três dimensões, foi decido a criação de um modelo bidimensional para simulação em CFD: quatro edifícios, de alturas variáveis, expostos ao efeito de vento de amplitude constante, e a jusante destes, no topo de um quinto edifício de altura fixa, a velocidade resultante foi simulada e registada. Para este modelo, foram utilizadas dimensões comparáveis com o já referido modelo à escala laboratorial. De seguida, uma rede neuronal foi projectada, cujos *inputs* de treino eram as alturas dos quatro edifícios a montante e o *output* a velocidade no topo do quinto edifício. Foram comparados resultados de valores que não tinham sido usados no treino da rede (desconhecidos) e rede demonstrou prever velocidades de vento com erros na ordem de 5%, ficando patenteado o grande potencial do uso de redes neuronais como ferramenta para a simulação de ventos em regimes urbanos.



## **keywords**

Wind prediction, urban environment, CFD simulation, neural network.

## **abstract**

In the current World energetic panorama, the prediction of urban winds has become very desirable as an energy alternative for domestic use. For this reason, systems that enable one to predict the regime of urban winds in a simple, effective and inexpensive way has become particularly attractive.

Empirical models have been applied, although with some limitations due to the inherent heterogeneity of the wind streams, in the study of this phenomenon. Furthermore, numerical methods have also been successfully implemented; however, these models are expensive and time-consuming, requiring a user to possess high technical skills. As a result, the present thesis intends to make a positive contribution to the development of a model that enables one, with simple and economical procedures, to predict wind regimes in urban environments. Therefore, it is the specific objective of the current thesis to demonstrate the effectiveness of using artificial neural networks in the prediction of wind regimes at the top of building roofs.

Experimental wind test results from a laboratory-scale model were utilized in order to validate the application of a CFD (Computer Fluid Dynamics) software to simulate wind regimes in urban environments. It was demonstrated that the CFD results were in relatively close agreement to the experimental wind tunnel results, especially above the buildings roof level. In order to diminish the complexity of the problem and computational time, due to the enormous number of possible three-dimensional scenarios, it was decided to produce a two-dimensional model for the CFD simulation: four buildings with variable heights, exposed to the effect of a constant-velocity wind stream, and following these buildings, the wind speed above the top of constant-height building was simulated and recorded. The dimensions of this model were of the same order of magnitude of the afore-mentioned laboratory-scale model. Afterwards, a neural network was designed, whose training inputs were the heights of the four variable-height buildings, and the output was the value the wind speed at the top of the fifth building. By using input results that have not been used during the training process of the network (unseen results), the network demonstrated to predict wind speed with errors not greater than 5%, demonstrating the vast potential of employing neural networks as a means to simulate winds in urban regimes.



*"Of all the forces of nature, I should think the wind contains the greatest amount of power"*  
...Abraham Lincoln

## Índice

Índice .....	i
Lista de figuras.....	iii
1. Introdução .....	1
2. Estado da arte .....	4
2.1. O Vento.....	5
2.1.1. Efeitos Locais.....	5
2.1.2. Tensões de corte .....	6
2.1.3. Turbulência .....	8
2.1.4. Variação no tempo .....	9
2.1.5. Medição da intensidade e direcção do vento .....	11
2.2. Análise e tratamento de dados de regimes de vento.....	11
2.2.1. Velocidade média vento.....	13
2.2.2. Distribuição da velocidade do vento .....	14
2.2.3. Modelos Estatísticos para análise de regimes de vento .....	14
2.3. A camada limite urbana .....	15
2.3.1. Escoamento na <i>canopy layer</i> (CL).....	17
2.3.2. O efeito da geometria urbana no escoamento.....	18
2.3.3. Efeito do vento ambiente.....	21
2.4. Modelos desenvolvidos para prever a intensidade do vento em ambiente urbano.....	23
2.4.1. Ensaios em túnel de vento .....	23
2.4.2. A utilização de modelos numéricos em ambiente urbano .....	24
2.4.3. Os modelos RANS .....	25
2.4.4. As limitações dos modelos <i>RANS</i> .....	26
2.4.5. <i>Large-eddy simulation</i> (LES) .....	26
2.4.6. Modelos matemáticos desenvolvidos para a previsão das características do vento em ambiente urbano.....	27
2.5. Conclusão da revisão bibliográfica.....	29



3. Descrição do modelo numérico <i>Ansys CFX, Release 11</i> .....	30
3.1. Características gerais.....	30
3.2. Geração da malha de cálculo .....	31
3.3. Descrição do modelo matemático utilizado .....	35
3.3.1. O modelo de turbulência <i>Standard <math>k-\epsilon</math></i> .....	37
3.4. Validação numérica dos resultados experimentais em túnel de vento.....	38
3.4.1. Simulação numérica tridimensional do modelo simulado em túnel de vento .....	42
3.4.2. Simulação numérica bidimensional do modelo simulado em túnel de vento.....	49
3.5. Ensaios de dependência de malha .....	53
4. Geração de cenários para treino da rede neuronal .....	56
4.1. Redes neurais .....	56
4.2. Treino de redes Neurais utilizando valores de velocidade calculados por simulação numérica bidimensional .....	61
4.3. Descrição do modelo Neuronal .....	66
4.4. Apresentação dos casos de teste.....	70
5. Conclusões e propostas de trabalho futuro.....	76
5.1. Conclusões .....	76
5.2. Trabalho Futuro .....	78
6. Bibliografia.....	79
Endereços na internet .....	82

## Lista de figuras

Figura 1 - Variação da velocidade do vento com a altura .....	6
Figura 2 - Rácio de velocidades para diferentes alturas rugosas .....	7
Figura 3 - Turbulência provocada por um obstáculo .....	9
Figura 4 - Variação da velocidade do vento ao longo do tempo .....	10
Figura 5 - Rosas-dos-ventos mostrando a distribuição da frequência, velocidade e energia em diferentes direcções .....	12
Figura 6 - Histograma para probabilidade da intensidade do vento .....	14
Figura 7 - As diferentes camadas de vento dentro da camada limite urbana .....	17
Figura 8 - Os vários regimes de vento .....	19
Figura 9 - Direcção do vento perpendicular à direcção do desfiladeiro .....	20
Figura 10 - Conjunto de edifícios com a mesma altura sujeito a escoamento de vento perpendicular à direcção dos desfiladeiros urbanos .....	20
Figura 11 - Volume de controlo onde se evidencia uma superfície do mesmo .....	32
Figura 12 - Discretização de um domínio de cálculo utilizando malha estruturada .....	33
Figura 13 - Discretização de um domínio de cálculo utilizando malha não estruturada .....	34
Figura 14 - Modelo à escala utilizado para simulações em túnel de vento .....	39
Figura 15 - Vista de topo do modelo utilizado com as dimensões em milímetros .....	40
Figura 16 - Vista em corte do modelo, onde se pode visualizar o ponto C .....	41
Figura 17 - Vista em corte da malha tetraédrica aplicada no domínio computacional e em redor dos edifícios .....	41
Figura 18 - Vista do domínio computacional, onde a linha a amarelo corresponde à elevação do ponto C ao longo do eixo yy onde foram registados dados de velocidade .....	43
Figura 19 - Visualização dos vectores velocidade do vento traçados num plano que intersecta os edifícios a meio da sua altura .....	44
Figura 20 - Visualização de dois vórtices em contra rotação no plano a meia altura dos edifícios ..	45
Figura 21 - Visualização da figura 17, com a inserção de um novo plano em YZ, perpendicular ao anterior, onde estão representados vectores da velocidade do vento nesse plano .....	46
Figura 22 - Visualização do plano em YZ, com a respectiva representação dos vectores velocidade do vento .....	47
Figura 23 - Dados obtidos em túnel de vento no ponto C em função da altura ao solo .....	48
Figura 24 - Comparação entre os dados obtidos experimentalmente com dados obtidos por simulação numérica a duas e três dimensões .....	49
Figura 25 - Discretização do domínio bidimensional com malha estruturada homogénea .....	50
Figura 26 - Discretização do domínio bidimensional com malha não estruturada .....	51
Figura 27 - Representação dos vectores de velocidade num ensaio bidimensional com malha estruturada .....	51

Figura 28 - Velocidade média no ponto C em função da altura ao solo, para o modelo k-e utilizando malha estruturada e não estruturada .....	52
Figura 30 - Valores da intensidade do vento acima do segundo edifício de teste para malha estruturada de diferentes tamanhos.....	53
Figura 31 - Erro relativo da velocidade medida em simulações k-e, para diferentes tamanhos de malha estruturada relativamente à malha de dimensão mínima de 6 [mm].....	54
Figura 32 - Funções de activação <i>tansig</i> e <i>logsig</i> .....	58
Figura 33 - Modelação geométrica do cenário 37, onde está representada uma zona com aspect ratio compreendido entre 0.3 e 0.7 .....	62
Figura 34 - Velocidade do ar imposta como condição de fronteira à entrada do domínio computacional.....	63
Figura 35 - Condições de fronteira aplicadas à geometria correspondente ao cenário 37.....	63
Figura 36 - Campo de velocidades referente ao cenário 37.....	64
Figura 37 - Modelação geométrica do cenário 4, onde está representada uma zona com <i>aspect ratio</i> igual menor que 0.3 .....	65
Figura 38 - Campo de velocidades referente ao cenário 4 .....	65
Figura 39 - Matriz de vectores de dados de <i>input</i> utilizados no treino da rede neuronal artificial ...	66
Figura 40 - Vector de dados de <i>output</i> utilizado no treino da rede neuronal artificial .....	66
Figura 41 - Matriz de vectores de dados referentes a dez cenários já vistos pela rede e a dez cenários não vistos pela rede .....	67
Figura 42 - Vector de dados de velocidade do vento medidos 2 cm acima do edifício de teste nos cenários compreendidos entre 79-99.....	67
Figura 43 - Vector de dados de velocidade do vento simulados pela rede neuronal 2 cm acima do edifício de teste nos cenários compreendidos entre 79-99.....	67
Figura 44 - Arquitectura de rede neuronal artificial com 1 camada oculta e dois neurónios escondidos, evidenciando os vectores de <i>input</i> , <i>output</i> , pesos das ligações e funções de transferência.....	68
Figura 45 - Intervalo de confiança de uma determinada grandeza em função do desvio padrão ...	70
Figura 46 - Erro associado aos valores de velocidades simuladas, 2 cm acima do edifício de teste, para o algoritmo <i>traingd</i> , utilizando 49 cenários para o treino e 5 neurónios na camada oculta ....	71
Figura 47 - Erro associado aos valores de velocidades simuladas, 2 cm acima do edifício de teste, para o algoritmo <i>traingd</i> , utilizando 69 cenários para o treino e 5 neurónios na camada oculta ....	72
Figura 48 - Erro associado aos valores de velocidades simuladas, 2 cm acima do edifício de teste, para o algoritmo <i>traingd</i> , utilizando 89 cenários para o treino e 5 neurónios na camada oculta ....	73
Figura 49 - Erro associado aos valores de velocidades simuladas, 5 cm acima do edifício de teste, para o algoritmo <i>traingd</i> , utilizando 89 cenários para o treino e 5 neurónios na camada oculta ....	75

## 1. Introdução

A *Energy Information Administration*, [url<sub>1</sub>], afirmou que os países industrializados eram os responsáveis por mais de metade do consumo global de energia em 2001. Sendo os grandes consumidores, têm prosperidade suficiente e conhecimento para apostarem fortemente nas energias renováveis. Nestes países a maioria das pessoas já têm consciência de que os recursos fósseis estão a desaparecer e do enorme impacto que o seu elevado consumo tem no ambiente. Como consequência a necessidade de se recorrer a fontes energéticas renováveis nos países industrializados tem tendência a aumentar.

Não está provado que o aumento de temperatura na última década seja causado pela emissão excessiva de dióxido de carbono, resultantes da queima de combustíveis fósseis. As opiniões diferem entre especialistas no que toca às alterações climáticas serem o resultado directo da poluição, [url<sub>2</sub>]. Ainda assim, existem indicações de que o efeito de estufa provocado pelo aumento da concentração de dióxido de carbono na atmosfera impeça que se continuem a “queimar” a este ritmo as reservas de combustíveis fósseis.

Com o aumento da população mundial, segue a procura energética. A *Energy Information Administration* prevê um aumento de 2% nos próximos vinte anos no que toca ao consumo energético, sendo os combustíveis fósseis o maior recurso. A pergunta que fica no ar logo à partida é o porquê de se correr o risco de deteriorar o ambiente de forma severa, nos próximos anos? Talvez face a este cenário, bastasse apenas o simples facto de o planeta estar em risco para catalisar a mudança para fontes de energias renováveis. Mas existem muitos mais incentivos, alguns dos quais já não serão novidade para a maior parte das pessoas pertencentes a países industrializados ou em vias de industrialização. Peritos, (url<sub>3</sub>), afirmam que os combustíveis fósseis estão ser esgotados, prevêem também que o pico de produção destes seja nos próximos três anos. Ainda assim existe muita controvérsia no que toca a este ponto, pois depende muito do estado em que se encontrem as prospecções de reservas de energia fóssil e do ritmo a que estas sejam consumidas no futuro. Independentemente de tudo o que foi dito anteriormente é esperado que as reservas continuem a diminuir e que o consumo continue a aumentar, o que terá um impacto enorme nos preços da energia e no modo de vida das comunidades. Sendo os países do médio oriente dos maiores produtores desta fonte energética, a situação instável que atravessa faz com que existam variações consideráveis no custo das energias fósseis, dado que a produção mundial depende muito das suas reservas. Portanto uma mudança no sentido de se promover um maior consumo de energia renovável, poderia reduzir a dependência que existe em relação a estes países. Existe ainda uma outra forte razão para esta mudança, o custo da energia. Este custo inclui não só o preço dos combustíveis fósseis, mas também o custo inerente aos problemas de saúde

das populações provocados pela poluição associada aos mesmos. É difícil contabilizar ao certo, mas como afirmou Chandler, [2004], "to not incorporate externalities in prices ... is demonstrably wrong". Isto significa que, se quisermos comparar o custo da energia vindos das diversas fontes, é importante também incluir os custos adicionais inerentes ao processo e do qual não nos podemos dissociar, sejam eles custos relativamente ao meio ambiente, custos de saúde, entre outros. Chandler, [2004], entre outros, dão a título de exemplo o que acontece na Dinamarca onde o custo total (incluindo os custos externos) de produção de um KWh de energia fóssil a partir do carvão está entre 7-10 c€/KWh, superior ao custo de produção de um KWh a partir da energia eólica onde esse custo global se situa entre os 4-4,5 c€/KWh. São várias as razões que indicam um aumento da procura de energias renováveis no futuro. Ainda assim estamos muito habituados ao uso de recursos fósseis com a agravante de estes possuírem elevada densidade energética quando comparados com os recursos renováveis que possuem baixa densidade energética. São necessárias grandes áreas de forma a se poderem implantar o maior número possível de unidades produtoras, de forma a se conseguir obter a partir da natureza a maior quantidade de energia possível. Não é ainda possível suprir nem metade das necessidades energéticas mundiais a partir de fontes renováveis, e no futuro vai ser ainda mais complicado. Por isso deve-se apostar em todas as formas de energias renováveis como solar, vento, hídrica, biomassa, geotérmica, etc. Todas terão o seu espaço, e todas deverão ser utilizadas.

Em alguns casos até se podem combinar várias fontes de energia renovável de forma a se ter uma produção mais constante. A título de exemplo podemos combinar energia solar com eólica dado que existe mais vento no inverno quando o sol não é tão forte. Devemos também ter algum cuidado porque eventualmente mais importante do que canalizar recursos para se conseguir cada vez produzir mais e mais energia, a partir de fontes renováveis, é conseguir moderar o seu consumo. Por outras palavras, devemos conseguir combinar a produção de energia renovável com uma diminuição eficaz do seu consumo.

De acordo com *Buildings Energy Data book*, [2003], e com o *ministry of Housing, Spatial Planning and the Environment*, [url<sub>4</sub>], os edifícios consomem de uma forma geral cerca de 40 % do total da energia consumida, existindo já uma série de trabalhos em curso que visam reduzir este consumo. Pioneiros introduziram nesta área de construção conceitos de edifícios que pretendem ser mais eficientes do ponto de vista energético, como *Zero Energy Design (ZED)* ou o *Lower Energy Design (LED)*.

No entanto a aplicação deste tipo de conceitos não é de forma geral aplicada voluntariamente, sendo por vezes imposta por lei. Na Holanda existe um regulamento designado de coeficiente de performance energético que é aplicado para que se consiga obter uma diminuição de consumo energético nos edifícios, [url<sub>4</sub>].

Os edifícios *LED* ou *ZED*, são capazes de produzir energia por terem incorporado mecanismos que utilizam fonte renovável, apresentando por isso uma mais baixa tarifa energética dado que utilizam conjuntamente fontes de energia convencionais e fontes renováveis.

Em ambiente urbano, uma das fontes de energia renovável é o vento. Se quisermos comparar os dois tipos de terreno, zona rural e ambiente construído, constatamos que o ambiente construído apresenta uma maior rugosidade, isto significa que o vento ao atravessar uma zona rural sofre menos perturbações do que ao atravessar um ambiente urbano. Esta maior rugosidade causa em ambiente urbano uma menor velocidade de vento quando comparando com zonas rurais. Para que o aproveitamento seja viável em zona urbana é necessária a existência de acelerações de vento locais. O vento que passa em redor de edifícios mais elevados pode ser bastante superior do que a média de vento num local urbano mais comum. Os edifícios altos podem ter configurações específicas, de forma a que a velocidade do vento aumente localmente, e podem também possuir turbinas eólicas dedicadas que permitam uma ainda maior captação de energia eólica. Desta forma um edifício pode ser mais do que um mero mastro para implantação de pequenas torres eólicas, mas a sua forma pode ser usada para acelerar e concentrar uma maior massa de vento, obrigando-a a atravessar uma eventual turbina eólica específica para a construção em questão. A esta categoria de turbinas que podem ser usadas em edifícios dá-se o nome de *BAWT (Building-Augmented Wind Turbine)*.

## 2. Estado da arte

O vento é um fenómeno natural, sendo a sua intensidade difícil de prever devido a todos os outros fenómenos naturais que o condicionam. O factor crítico que influencia a potência extraída de uma turbina de vento é a velocidade do vento. Devido a este parâmetro ter um expoente cúbico na equação da potência extraída, (Equação 1), uma pequena variação da intensidade do vento implica um ganho ou perda substancial de potência e consequente energia mecânica que poderia ser extraída ou convertida em energia eléctrica. Um aumento na velocidade do vento em 10%, implica um aumento na produtividade da turbina em cerca de 30%. Sobre estimativas na previsão da velocidade do vento resultam em menos energia disponível do que a prevista, o que pode ser desastroso para a viabilidade económica de um projecto enquanto, subestimativas podem ser menos perigosas no sentido económico.

$$C_p = \frac{P}{0.5\rho V^3 A} \quad (1)$$

A intensidade de vento e a sua direcção para um determinado local, variam aleatoriamente ao longo do tempo. Além da variabilidade diária e sazonal, o vento também sofre variações ao longo dos anos que podem chegar a valores entre 10 e 30 %. Desta forma, o comportamento do vento, num local preferencial, é um fenómeno que deve ser bem analisado e compreendido.

Compreender a natureza do vento é de extrema importância no sentido em que para dimensionar correctamente uma turbina de vento, e para que os componentes da turbina sejam escolhidos de acordo com as características de vento num potencial local de implementação, é necessário compreender bem o fenómeno e conseguir fazer uma boa estimativa da intensidade do mesmo de forma a se poder prever com alguma precisão e quantificar a quantidade de energia que poderá extrair.

A velocidade média do vento, num dado local, é um bom indicador preliminar se o mesmo poderá ser um potencial local para extracção de energia do vento. Um local que apresente um mínimo de velocidade de 7 m/s, à partida é de esperar que seja um bom local para conversão da energia do vento em energia eléctrica. No entanto além de se saber a sua velocidade média, a partir do espectro de vento, a sua distribuição temporal é ainda mais importante de forma a que se consiga com mais rigor prever e quantificar com maior precisão a energia que se pode extrair num determinado local. Modelos estatísticos têm sido implementados com sucesso, para definir a distribuição da velocidade de vento ao longo de um período temporal. Se existirem bons modelos de previsão para a distribuição da velocidade do vento para um determinado local preferencial, é então possível assegurar com um bom intervalo de confiança o potencial energético existente.

As grandes questões que se nos colocam são do tipo: "Que quantidade de energia por unidade de área de rotor poderei ter eu disponível?", "Qual a percentagem de tempo que terei de vento dentro

da gama mínima de valores para gerar energia?”, “Qual a velocidade de vento mais frequente neste local?” ou ainda “Qual a velocidade de vento que mais contribui para a produção efectiva de energia?”, estas questões são de real interesse e as respostas às mesmas vão ser abordadas de forma genérica neste capítulo

São estas e muitas outras questões que são colocadas, sendo que o objectivo da presente tese pretende dar um contributo para uma melhor compreensão do fenómeno.

## **2.1. O Vento**

O planeta recebe cerca de  $1,7 \times 10^{14} \text{ KW}$  de potência sob a forma de radiação solar. A radiação aquece o ar atmosférico, este aquecimento é maior no equador e menor nos pólos. Assim o ar ao aquecer a sua densidade decresce e ele sobe, criando gradientes de pressão locais e fazendo com que as massas de ar mais frias se desloquem dos pólos em direcção às zonas equatoriais ocupando o espaço deixado pelo ar que entretanto subiu para as camadas mais elevadas da atmosfera. É este movimento das massas de ar que origina o vento. Este fenómeno gera o chamado vento Global, que ao não ser afectado pela rugosidade superficial da terra se encontra em altitudes mais elevadas. A rotação da terra origina outro fenómeno curioso junto à superfície terrestre, o efeito de *Coriolis* designado após a sua descoberta por *Gustave Gaspar Coriolis*. Devido a este efeito o ar ao deslocar-se das zonas de maior pressão para as de menor pressão, é desviado.

Assim o ar desloca-se paralelamente às linhas isobáricas. No hemisfério norte o vento tende a rodar no sentido horário, enquanto que no hemisfério sul tende a rodar no sentido anti-horário.

### **2.1.1. Efeitos Locais**

Alterações na intensidade e direcção do vento, para uma altitude até 100 metros, são muito importantes no que toca à conversão de energia eólica em energia eléctrica ou de outro tipo.

Durante o dia o solo aquece mais rapidamente do que o oceano, como consequência directa o ar junto ao solo aquece mais rapidamente e sobe originando a brisa vinda do oceano. Durante a noite o processo reverte.

Em vales no seio de zonas montanhosas, o ar é aquecido e sobe as colinas das montanhas durante o dia. Este ar que sobe as colinas é substituído por ar mais fresco, originando a movimentação de massas de ar em zonas mais elevadas. À noite o processo reverte. É frequente, este fenómeno, gerar fortes correntes de vento. Tensões de corte no vento, turbulência e acelerações do vento ao atravessarem obstáculos são outros tipos de efeitos locais que podem acontecer.



### 2.1.2. Tensões de corte

O escoamento de ar acima da superfície terrestre é retardado por tensões tangenciais de corte provocadas pela superfície da terra (camada limite). Esta resistência pode ser causada pela rugosidade do próprio terreno, pela vegetação, edifícios ou outros obstáculos existentes na superfície terrestre. A título de exemplo podemos ver um perfil de velocidades típico num local sem obstáculos, Figura 1.

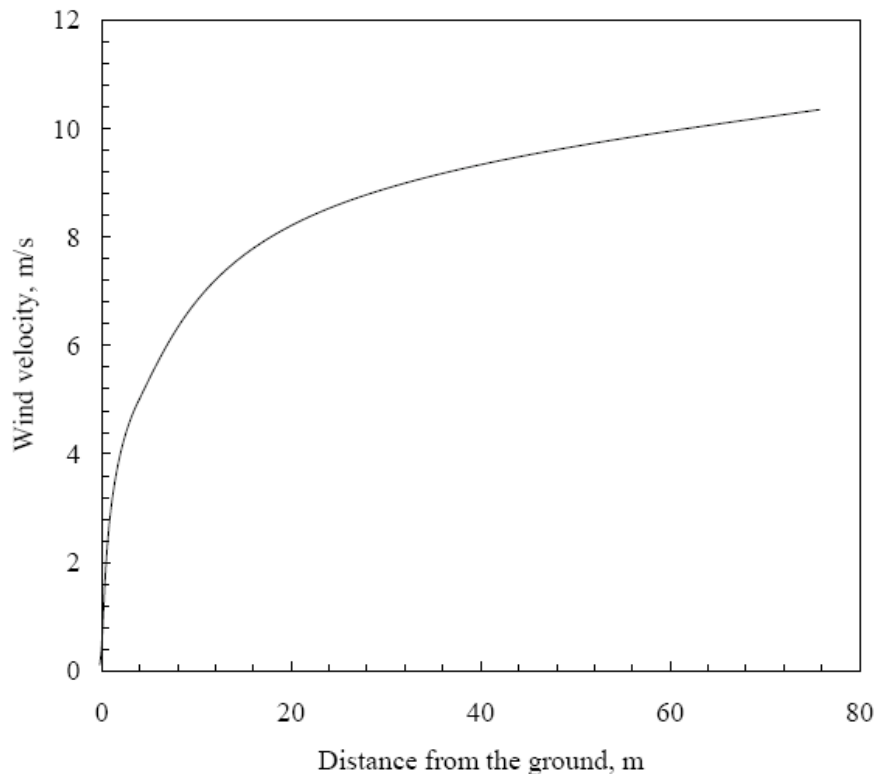


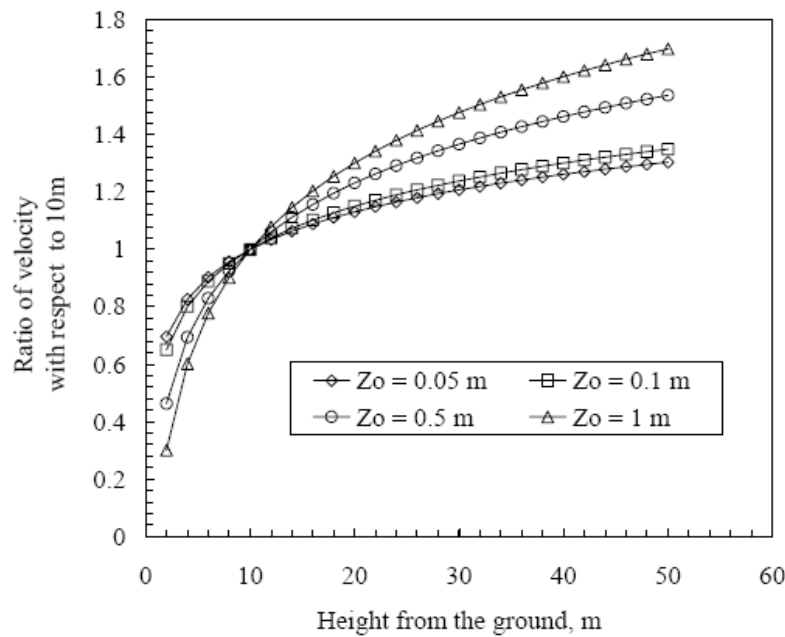
Figura 1 - Variação da velocidade do vento com a altura

A rugosidade superficial de um dado tipo de terreno, é normalmente representada pela classe de rugosidade ou altura rugosa,  $Z_0$ . O parâmetro altura rugosa pode assumir valores próximos de zero metros (superfície o mar), até valores próximos de dois metros (zonas urbanas). Estes valores estão normalmente dentro deste intervalo podendo no entanto variar de autor para autor. Existem valores típicos que podem ser utilizados mediante o tipo de terreno com que o investigador se pode deparar como por exemplo, 0.005 metros para superfícies lisas, 0.025-0.1 metros para superfícies abertas com relvado, 0.2-0.3 metros para zonas de cultivo, 0.5-1 metros superfícies com árvores e arbustos e valores entre 1 a 2 metros para florestas e zonas urbanas, [Sathyajith Mathew, 2006].

Os dados relativos à velocidade do vento, podem ser recolhidos a alturas diferentes. Na maioria dos casos os dados são autenticados a 10 metros por recomendação da *World Metereological*

*Organization (WMO).* Para se fazer a estimativa da velocidade de vento no rotor de forma a se poder quantificar a quantidade de energia passível de ser produzida, os dados de velocidade de vento podem ser recolhidos através de sensores dispostos em altitude, podendo ser corrigidos mediante o tipo de cenário em causa. Embora, o que nos interesse verdadeiramente seja, a previsão local no topo de edifícios e não em espaços abertos para implantação de grandes parques produtores, não é possível a compreensão desses micro fenómenos sem se compreenderem os fenómenos de base como as correcções a ser efectuadas devido à rugosidade do terreno. Devido ao efeito da camada limite, a velocidade do vento cresce com a altitude seguindo um padrão logarítmico. Se a velocidade do vento estiver disponível a uma determinada cota  $Z$  e a altura rugosa for  $Z_0$ , então a velocidade a uma altitude de  $Z_R$  pode ser dada pela Equação 2.

$$V(Z_R) = V(Z) \frac{\ln \frac{Z_R}{Z_0}}{\ln \frac{Z}{Z_0}} \quad (2)$$



**Figura 2 - Rácio de velocidades para diferentes alturas rugosas**

Onde  $V(Z_R)$  e  $V(Z)$  são as velocidades correspondentes às altitudes de  $Z_R$  e  $Z$  respectivamente. Assim se a velocidade do vento a 10 metros de altitude for de 7 m/s e a altura rugosa for de 0.1 metros, a velocidade do vento a 40 metros acima do solo será igual a 9.1 m/s. A potência disponível a 40 metros de altitude é cerca de 2.2 vezes superior em média do que a 10 metros.

Em determinadas situações, podemos ter disponíveis dados de vento a partir de uma localização de referência (estação meteorológica) a uma determinada altitude. Estes dados podem ser corrigidos para uma altitude, localização e altura rugosa diferentes. Assim é possível traçar o novo

perfil de velocidades de acordo com o local em questão. Descritos estes casos, é lógico assumir que, a velocidade do vento a partir de uma determinada altitude não é afectada de forma significativa pela altura rugosa. Esta altitude de referência pode ser considerada a cerca de 60 metros acima do solo, [Sathyajith Mathew, 2006]. Assim podemos expressar a velocidade a 60 metros, para a localização de referência, de acordo com a Equação 3.

$$V(60) = V(Z_R) \frac{\ln \frac{60}{Z_{0R}}}{\ln \frac{Z_R}{Z_{0R}}} \quad (3)$$

Onde  $Z_{0R}$  é a altura rugosa para a localização de referência. Considerando a nova zona de estudo, ou zona de referência, obtêm-se a Equação 4.

$$V(60) = V(Z) \frac{\ln \frac{60}{Z_0}}{\ln \frac{Z}{Z_0}} \quad (4)$$

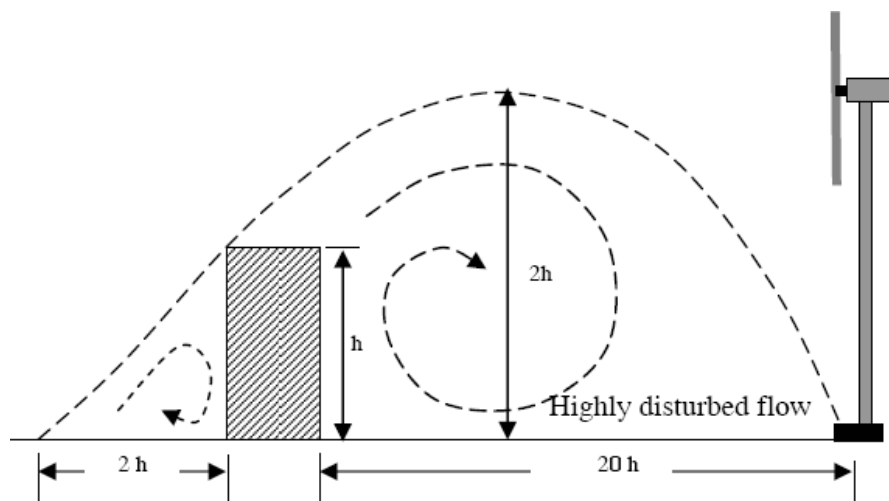
Dividindo a Equação 3 pela Equação 4, resulta a Equação 5.

$$V(Z) = V(Z_R) \left[ \frac{\ln \left( \frac{60}{Z_{0R}} \right) \ln \left( \frac{Z}{Z_0} \right)}{\ln \left( \frac{60}{Z_0} \right) \ln \left( \frac{Z_R}{Z_{0R}} \right)} \right] \quad (5)$$

Estas correcções serão de extrema utilidade a posteriori dado que, na modelação de cenários a estudar, serão simulados conjuntos de cenários, com velocidade imposta definida por um perfil de velocidades completamente desenvolvido dentro de uma área urbana.

### 2.1.3. Turbulência

A intensidade e direcção do vento pode mudar bruscamente quando este atravessa obstáculos, como árvores, rochas e edifícios. Este fenómeno dá-se devido à turbulência gerada no escoamento. A influência desta turbulência no escoamento faz-se sentir a jusante e a montante do obstáculo, como pode ser visualizado na Figura 3. A presença de turbulência num escoamento pode diminuir a potência disponível assim como gerar tensões de fadiga nos componentes da turbina.

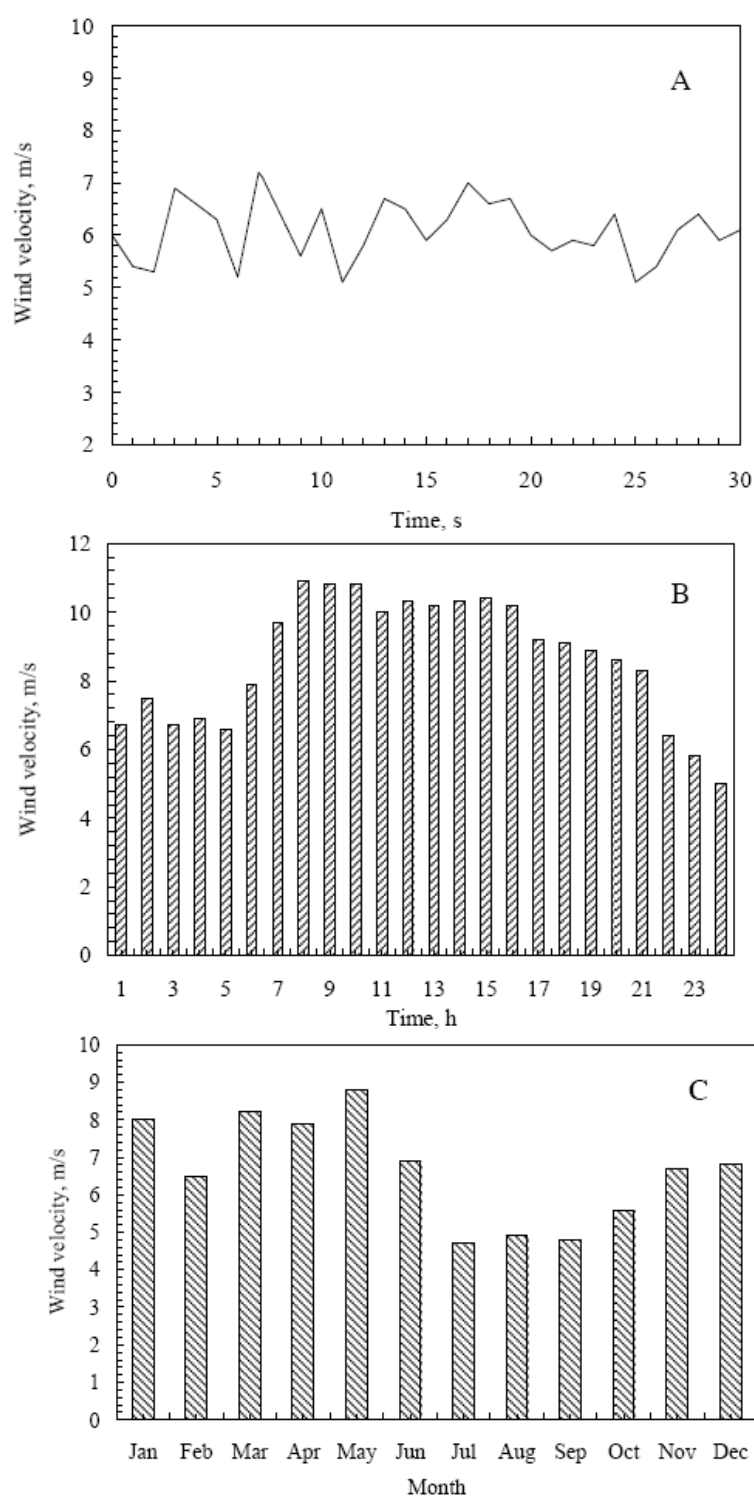


**Figura 3 - Turbulência provocada por um obstáculo**

A intensidade turbulenta varia com a forma e a dimensão do obstáculo. Dependendo da sua natureza, a região turbulenta pode-se estender em altitude a uma distância até duas vezes a altura do obstáculo. O mesmo poderá acontecer a montante do obstáculo. A Jusante esta região turbulenta pode-se alastrar até 10-20 vezes a altura do obstáculo, como se pode visualizar na Figura 3. Por isso antes de se escolher a tecnologia a aplicar os obstáculos circundantes terão que ser tidos em conta. Assim sendo na escolha da tecnologia a aplicar terá de levar em linha de conta a altura a que deverá estar o pilar de suporte do aerogerador, no caso da implementação passar por turbina de vento em cima do edifício, de forma a que se possa extrair o máximo do potencial eólico, ou então a selecção do moinho eólico deverá ser cuidadosamente efectuada de forma a maximizar aproveitamento da intensidade local de vento existente.

#### **2.1.4. Variação no tempo**

A direcção e intensidade do vento mudam rapidamente com o tempo. De acordo com estas variações a potência e energia disponíveis também variam. Estas variações podem ser flutuações pontuais no tempo, variações diárias, nocturnas ou ainda variações sazonais.



**Figura 4 - Variação da velocidade do vento ao longo do tempo**

A título de exemplo, na Figura 4-A, pequenas variações de vento podem ser encontradas num intervalo de tempo tão pequeno como 30 segundos. Onde as velocidades mínima e máxima são respectivamente 5,1 e 7,2 m/s. Estas pequenas flutuações da velocidade do vento são causadas pela configuração do local onde são registados os dados e por alterações climáticas.

Na Figura 4-B, a razão mais provável para esta variação de velocidade é a diferença de temperaturas entre a superfície do oceano e da superfície terrestre. Há ainda que referir, que as variações diurnas podem ser mais vantajosas dado que a intensidade de vento é mais importante no que toca à produção de energia durante o dia relativamente ao período nocturno. A velocidade do vento para uma determinada localização também pode mudar de acordo com a época, na Figura 4-C podemos verificar que o vento é menos intenso durante os meses de Julho a Outubro. Este fenómeno pode ser causado pela variação do aquecimento do ar, provocado pela maior ou menor intensidade de luz solar incidente durante o ano, devido à própria inclinação da terra e posição relativa da terra em relação ao Sol, quando esta descreve a sua órbita elíptica à volta deste astro. Este efeito pode ser mais severo nos pólos. O conhecimento destas variações na velocidade do vento ao longo do tempo são de extrema importância de forma a se poder garantir com maior precisão a quantidade de energia disponível de um determinado local.

#### **2.1.5. Medição da intensidade e direcção do vento**

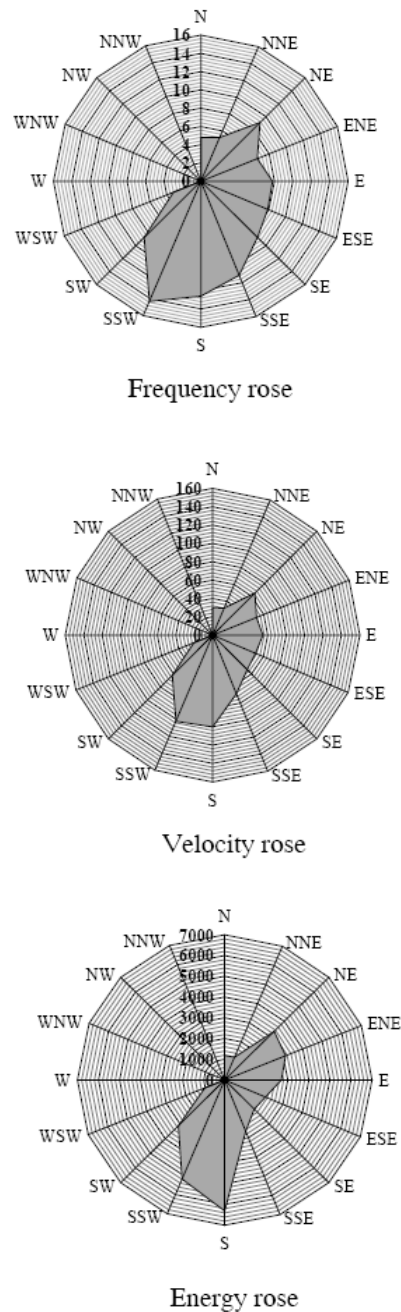
Um conhecimento preciso das características do vento, num potencial local, é essencial para um bom projecto eólico que vise o maior aproveitamento possível deste recurso natural e que naturalmente o viabilize economicamente. A informação base para projectos deste género é a intensidade e direcção do vento predominante, assim como as flutuações deste ao longo do tempo. Dados recolhidos destes parâmetros (intensidade e direcção) a partir de uma estação meteorológica são muito importantes pois possibilitam um melhor conhecimento do espectro de vento disponível no local de análise. No entanto para uma análise mais precisa do espectro de vento no local, tem que se recorrer a instrumentos de medição tais como anemómetros que podem ser rotacionais (anemómetro de copo ou de hélice), de pressão, termoeléctricos ou ultrasónicos. Agulhas de vento são utilizadas para registar dados relativos às mudanças de direcção do vento, ao longo do tempo. As novas gerações de anemómetros já têm incorporado agulhas de vento.

#### **2.2. Análise e tratamento de dados de regimes de vento**

A informação relativa à direcção e intensidade de vento pode ser representada através de rosas-dos-ventos. As rosas-dos-ventos são cartas que indicam a distribuição da intensidade do vento em diferentes direcções. Existem três tipos de informação que podem ser representados através de rosas-dos-ventos.

1. A percentagem de tempo, para a qual existe uma maior predominância de vento a partir de uma determinada direcção
2. O produto entre esta percentagem e a velocidade média de vento nesta direcção
3. O produto entre a percentagem de tempo e o cubo da velocidade do vento. Esta carta ajuda na identificação da energia disponível a partir de diferentes direcções.

Típicas cartas de rosas-dos-ventos podem ser visualizadas na Figura 5.



**Figura 5 - Rosas-dos-ventos mostrando a distribuição da frequência, velocidade e energia em diferentes direcções**

Para se poder estimar a energia do vento de um potencial local, os dados recolhidos no local devem ser correctamente analisados e interpretados. Dados recolhidos de uma estação meteorológica próxima do local de estudo durante um determinado período de tempo são muito úteis porque permitem efectuar uma boa estimativa inicial. Estes dados, que podem ser recolhidos por um longo período de tempo, devem ser cuidadosamente extrapolados de forma a representarem o melhor possível perfil de vento de um potencial local.

Geralmente, depois deste estudo inicial, medições de campo são efectuadas por períodos de tempo curtos. Normalmente dados recolhidos de vento ao longo de um ano são suficientes para representar as variações do perfil de vento nesse período com uma margem de erro de 10%.

Os sistemas mais recentes de medição de ventos, efectuem a medição da velocidade do vento por um período de tempo pré definido e devolvem a média da velocidade do vento. É muito comum este intervalo de medição estar programado para 10 minutos, isto é, de 10 em 10 minutos o sistema de medição devolve médias de velocidade de vento. A maioria dos *softwares* que tratam dados de vento está configurada para efectuar leituras em intervalos de tempo de 10 minutos. Estes curtos registos de dados são medidos e agrupados com o auxílio de modelos e softwares de forma a se ter uma previsão precisa da energia disponível. Os dados são agrupados de acordo com o tipo de análise em curso. No caso de se querer estimar a energia disponível a diferentes horas, então os dados deverão ser agrupados numa base horária. Estes também podem ser agrupados numa base mensal ou anual.

### 2.2.1. Velocidade média vento

Um dos dados mais relevantes na avaliação de um potencial local, é a velocidade média do vento. De forma simplificada, esta, pode ser dada pela Equação 6.

$$V_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n V_i \quad (6)$$

Onde  $V_m$  é a velocidade média do vento,  $V_i$  é a velocidade instantânea e  $n$  é o número de dados existentes.

No entanto se o interesse for o cálculo do potencial energético disponível num determinado local, a Equação 7, é mais eficaz na medida em que o cubo da velocidade do vento é proporcional a potência que se pode extrair do mesmo, Equação 1.

$$V_m = \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n V_i^3 \right)^{\frac{1}{3}} \quad (7)$$



### 2.2.2. Distribuição da velocidade do vento

Aparte da importância de se conhecer a velocidade média do vento, a sua distribuição também é um factor crítico no que toca a um estudo eficaz no sentido de se determinar se o local em análise é passível de uma eventual exploração energética. Duas turbinas instaladas em dois sítios diferentes com a mesma velocidade média de vento podem não originar necessariamente o mesmo *output* energético. Uma forma de se determinar a variabilidade da intensidade do vento é através do desvio padrão dado pela Equação 8.

$$\sigma_v = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (V_i - V_m)^2}{n}} \quad (8)$$

Valores baixos significam uma uniformidade nos dados das intensidades do vento, enquanto valores elevados implicam grande variabilidade.

### 2.2.3. Modelos Estatísticos para análise de regimes de vento

Um histograma típico para a velocidade do vento pode ser dado pela Figura 6.

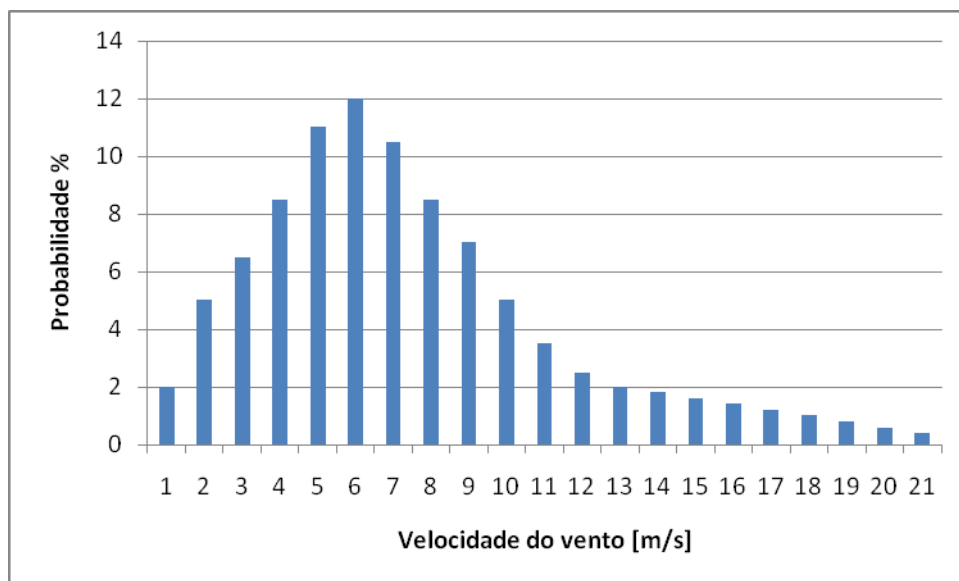


Figura 6 - Histograma para probabilidade da intensidade do vento

Este histograma é obtido a partir de dados de vento registados ao longo do tempo que podem cobrir vários anos. O histograma indica a probabilidade, ou a fracção de tempo, onde a velocidade do vento está compreendida entre os valores dados pela largura das colunas, neste caso de 1 m/s. O somatório das alturas das colunas é igual a 1 ou 100%. Quando a largura das colunas se torna tão pequena quanto se queira, o histograma transforma-se numa função contínua designada de

função de densidade probabilística. Uma interpretação simples desta função pode ser a probabilidade da velocidade do vento estar centrada num determinado valor, mais ou menos metade do valor anteriormente dado à largura das colunas do histograma. Esta função pode ser aproximada à designada função de *Weibull* dada pela Equação 9.

$$p(V) = \frac{k}{V} \left( \frac{V}{C} \right)^{k-1} e^{-\left( \frac{V}{C} \right)^k} \quad (9)$$

Onde  $p(V)$  é a frequência da ocorrência de uma determinada intensidade de vento  $V$ ,  $C$  é o parâmetro de escala e  $k$  é o parâmetro de forma. A forma de se obterem estes parâmetros podem ser consultadas através de vários autores com obras publicadas, [Sander Mertens, 2006]. Existe ainda a função cumulativa de *Weibull* devolve a probabilidade do valor da intensidade do vento exceder o valor  $V$ , e pode ser expressa pela Equação 10.

$$P(V) = e^{-\left( \frac{V}{C} \right)^k} \quad (10)$$

Uma variante da função cumulativa de *Weibull* pode ser encontrada frequentemente na literatura, quando se utiliza um valor típico de  $k$  igual a 2. Esta função é designada por distribuição cumulativa de *Rayleigh*.

### 2.3. A camada limite urbana

As características do fluxo de vento em ambiente urbano são conhecidas como sendo bem diferentes das existentes em ambiente com menor rugosidade superficial, onde o perfil de velocidades se desenvolve de forma bem comportada sobre uma superfície homogênea. Os diferentes cenários: campo, zona marinha, centros urbanos, etc., embora tendo diferentes alturas rugosas partilham uma característica comum. Desenvolvem uma camada limite, assim como um escoamento livre ao passar por uma placa plana. Dentro desta camada limite, cuja linha de separação com o fluido não perturbado tem o formato de uma função logarítmica, originam-se tensões de corte que as partículas de fluido exercem umas sobre as outras provocadas pela existência, ao nível do solo, de forças de atrito. Em zonas rurais este efeito será menos acentuado do que em zonas urbanas, onde a existência de uma maior rugosidade terá maior influência em todo o escoamento.

A camada limite que se desenvolve sobre um centro urbano é composta por uma camada externa (CLE), na qual as características do escoamento não são influenciadas pela mudança do parâmetro rugosidade e pela camada limite urbana (CLU), Figura 7 - As diferentes camadas de

vento dentro da camada limite urbana, na qual as características do escoamento estão associadas com as rugosidades não homogêneas que em larga escala caracterizam os centros urbanos.

A porção inferior da camada limite urbana designa-se por camada superficial **(CS)** ou por camada limite interna **(CLI)**, que se estende até a uma altitude de aproximadamente 10% do comprimento total da camada limite atmosférica **(CLA)**. Na camada superficial o escoamento é fortemente afectado pela geometria local. A camada superficial pode ser separada em duas regiões, a sub-camada inercial **(SCI)** e a sub-camada rugosa **(SCR)** que se pode estender até a uma altitude que pode variar entre duas a cinco vezes a **altura média dos edifícios (H)**, sendo que o valor inferior é o mais encontrado na literatura. As características do escoamento estão fortemente dependentes da disposição em que se encontram os edifícios, sendo os parâmetros relevantes a uniformidade na altura dos edifícios,  $h_{mean}$ , e o rácio entre a **altura dos edifícios (H)** e o **espaçamento (W)** existente entre os mesmos.

Fazendo variar o rácio H/W (*aspect ratio*) três tipos diferentes de comportamentos podem ocorrer, *isolated roughness flow*, o *wake interference flow*, e o *skimming flow*. No último caso (*skimming flow*), caso em que existe elevada densidade de construção nos centros urbanos, pode ser determinada a altitude que separa a sub-camada rugosa e a *canopy layer* (camada inferior). Neste caso uma distância  $d_u$  pode ser encontrada, a qual corresponde à altitude em que a velocidade média do perfil de velocidades tende para zero. O valor de  $d_u$  foi determinado e está entre  $\frac{2}{3}h_{mean}$  e  $\frac{3}{4}h_{mean}$ , inclusive valores mais elevados como  $0.92h_{mean}$  foram encontrados em medições a larga escala, Figura 7 - As diferentes camadas de vento dentro da camada limite urbana.

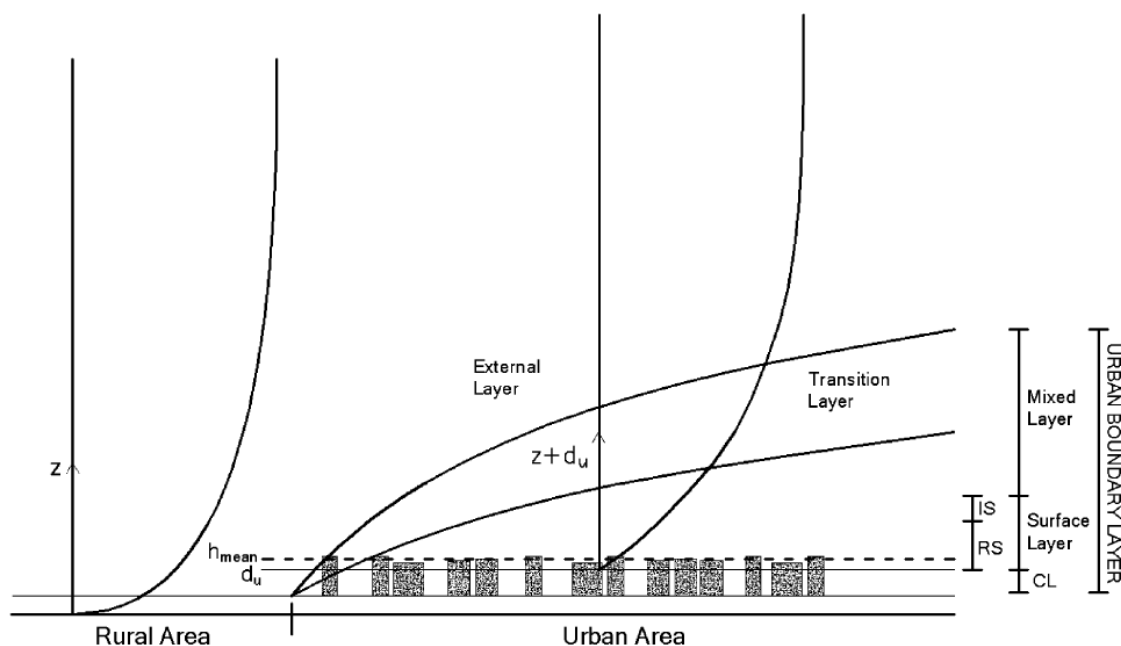


Figura 7 - As diferentes camadas de vento dentro da camada limite urbana

### 2.3.1. Escoamento na *canopy layer* (CL)

Na *canopy layer*, o escoamento é quase completamente dominado pela geometria construtiva existente, não sendo muito afectada pelo escoamento nas camadas imediatamente acima, nomeadamente na situação em que os edifícios têm um espaçamento pequeno entre eles, sofrendo por isso o fenómeno designado por *skimming flow*, figura 8. Neste caso a transferência de energia entre as camadas superiores da CLU e a CL, é responsável pela movimentação das massas de ar nos desfiladeiros urbanos e as características do escoamento dentro da CL parecem ser dependentes do fluxo de ar incidente.

O conhecimento do escoamento dentro da CL é de extrema relevância por permitir:

- Análise da difusão de poluentes
- A avaliação do conforto ao nível pedestre
- A caracterização das forças, geradas pelo vento, em estruturas no ambiente urbano

De entre os primeiros estudos referidos na literatura estão os realizados por Wise et al., [1965] e Isyumov et al., [1975, 1978]. Isyumov et al., [1975], efectuaram estudos em túnel de vento para a análise do fluxo de vento sobre o *World Trade Center plaza* e mostraram que na CL, ocorria uma variação da velocidade média do vento e da intensidade turbulenta. Wu et al., [1995], relataram resultados de medições em túnel de vento, onde tinham um arranjo de edifícios com as avenidas perpendiculares à direcção da velocidade do vento. Neste arranjo os edifícios tinham todos a mesma altura, sendo que um deles era muito mais alto que os restantes. Foram identificados dois

tipos de mecanismos para o escoamento, num deles o efeito de sombra que o edifício mais alto tinha nos imediatamente a jusante provocava uma recirculação no escoamento. Noutro cenário estudado, os edifícios tinham todos a mesma altura, e o regime de vento identificado para o escoamento foi o de *skimming flow*, figura 8.

### 2.3.2. O efeito da geometria urbana no escoamento

De forma genérica o desfiladeiro urbano é uma rua relativamente estreita entre edifícios e constitui a geometria de base das zonas urbanas. O desfiladeiro urbano possui um clima distinto de todos os outros, dado que neste, dominam fenómenos meteorológicos em micro escala, isto é, gera-se um micro clima que está relacionado com a geometria em questão e com as características do escoamento que o atravessa, [Oke, 1988].

O padrão do escoamento de vento dentro de um desfiladeiro urbano depende da sua geometria, em particular do *aspect ratio*. Baseado em medições no terreno, e em resultados de modelos matemáticos, Oke, [1988], identificou três regimes de escoamento para a situação em que a direcção do vento é perpendicular ao desfiladeiro urbano. Para edifícios com um grande espaçamento entre eles ( $H/W < 0.3$ ), as perturbações locais no escoamento provocadas pelos edifícios não interagem resultando no regime de *isolated roughness flow (IRF)*. Para um menor espaçamento entre edifícios ( $0.3 < H/W < 0.7$ ), a esteira gerada pela resistência ao escoamento do edifício a montante é perturbada pela recirculação criada pelo edifício imediatamente a jusante. Este regime de escoamento foi designado por *wake interference flow (WIF)*. Foi ainda registado outro regime para edifícios onde o espaçamento entre eles é ainda inferior a todos os outros já referidos ( $H/W > 0.7$ ). Neste regime predomina o *skimming flow (SF)*. Neste regime uma recirculação estável é desenvolvida entre edifícios e o escoamento ambiente é separado do escoamento particular que se regista ao nível das ruas.

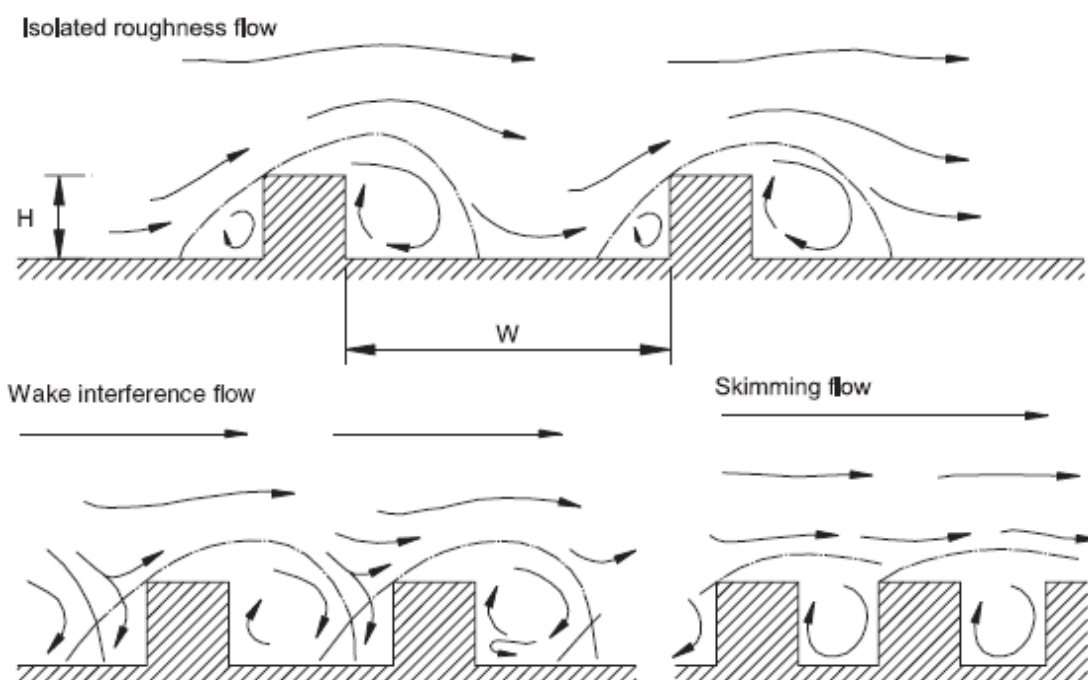


Figura 8 - Os vários regimes de vento

A força do vento nas recirculações geradas nos desfiladeiros urbanos depende principalmente da intensidade do escoamento ambiente, ou seja, acima do nível das coberturas dos edifícios (**SCR**). Estas recirculações também podem ser perturbadas pela turbulência induzida pelos veículos em movimento. Este fenómeno particular que não irá ser abordado no decorrer desta tese por não ser um mecanismo que afecte com importância relevante a zona de estudo para uma eventual implementação de mecanismos produtores ao nível das coberturas dos edifícios.

Dado que a geometria urbana tem um impacto enorme nos padrões de vento que se estabelecem nos desfiladeiros urbanos, o efeito que esta tem no escoamento do vento é alvo de grande atenção por muitos investigadores. Assim parâmetros como o *aspect ratio*, são dos mais importantes pois permitem identificar o regime de vento (**SF**, **WIF**, e **IRF**) de acordo com o cenário alvo. Vários estudos sugerem valores críticos para o parâmetro *aspect ratio* e que correspondem a mudanças de regime de vento, como pode ser observado na Tabela 1.

Tabela 1 - Valores críticos de aspect ratios ( $H/W$ ) para transições entre regimes de ventos

Transição	IRF-WIF	WIF-SF
[Oke, 1988]	0,3	0,7
[Sini et al., 1996]	0,11-0,125	0,67
[Baik and Kim, 1999]	-	0,5-1

Há que referir que os valores encontrados na Tabela 1, correspondem a casos de estudo 2D. Caso em que os desfiladeiros urbanos têm um comprimento infinito, dado que a direcção do escoamento é perpendicular à direcção do desfiladeiro, Figura 9. Existe outro aspect ratio que também afecta a transição no regime de vento, o rácio entre o **comprimento (L)** do desfiladeiro e a **altura do edifício (H)**, Figura 10. Este parâmetro também pode afectar as recirculações de ar geradas entre os edifícios, [Chan et al., 2001, 2003].

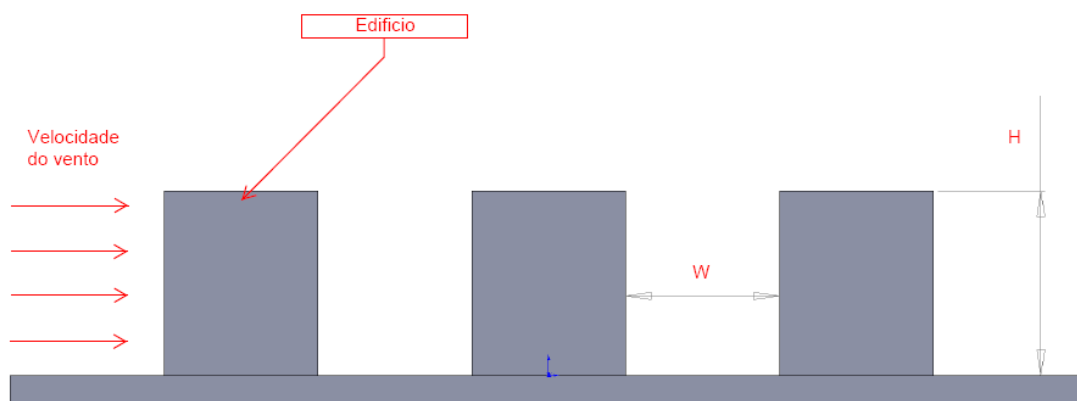


Figura 9 – Direcção do vento perpendicular à direcção do desfiladeiro

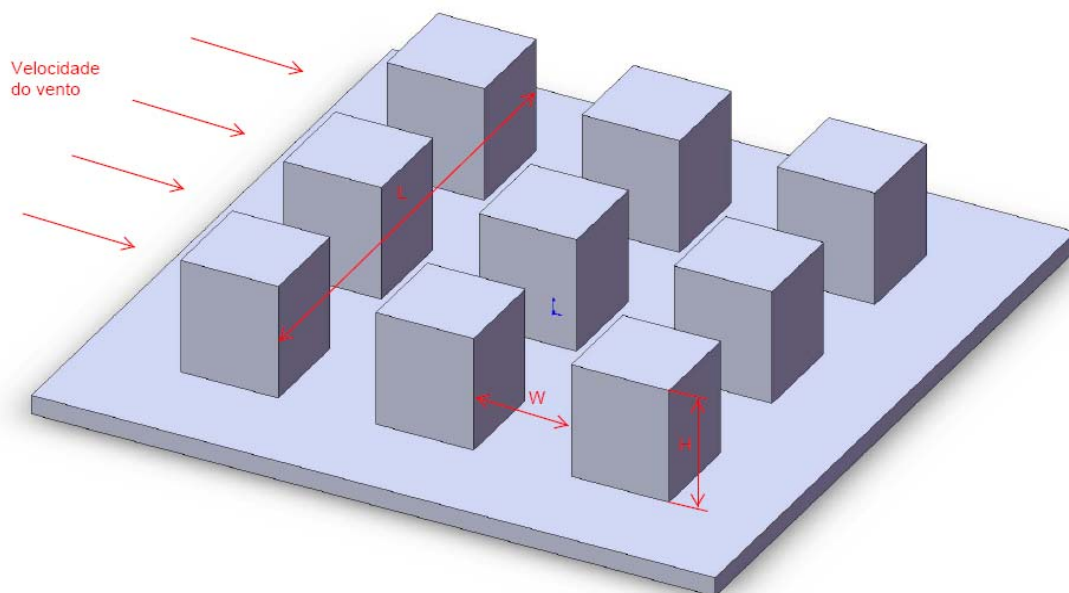


Figura 10 - Conjunto de edifícios com a mesma altura sujeito a escoamento de vento perpendicular à direcção dos desfiladeiros urbanos

O regime de vento **SF**, que já vem sendo muito referenciado na literatura, pode gerar várias recirculações de ar entre edifícios (padrões de vento). Isto acontece pela variação do parâmetro *aspect ratio*, como se pode verificar na Tabela 2.

**Tabela 2 - Diferentes padrões de vento, em regime SF, que dependem dos vários aspect ratios (H/W) em desfiladeiros urbanos.**

<b>Padrões de vento</b>	<b>1 Recirculação</b>	<b>2 Recirculações</b>	<b>3 Recirculações</b>
[Sini et al., 1996]	0.67-1.67	>1.67	
[Baik and Kim, 1999]	1	1.5-3	3.5
[Kim and Baik, 2001]	0.6-1.2	1.4-3.2	3.4-3.6
[Jeong and Andrews, 2002]	0.67-1.6	1.6-2.67	>2.67
[Huang et al., 2000]	0.25-1	-	-

Na vida real, as configurações das geometrias urbanas são muito variadas. Muitos investigadores conduziram estudos no sentido de averiguar os efeitos no escoamento em diferentes configurações. Assimakopoulos et al., [2003] realizou estudos importantes em configurações particulares em 2D. Na 1ª configuração o edifício a montante era mais alto que o edifício imediatamente a jusante. Na 2ª configuração o edifício a montante era mais baixo que o edifício a jusante. O autor verificou variações no escoamento provocadas pelas duas configurações assimétricas nos edifícios. As intersecções entre ruas, são geometrias urbanas comuns em ambientes urbanos realistas, existindo no entanto poucos estudos relacionados com os seus efeitos no fluxo de ar que as atravessa. Estas intersecções entre ruas, num determinado escoamento, podem originar zonas de baixas pressões. Estas zonas irão “sugar” o fluido circundante e vão alterar de forma muito significativa o escoamento. O estudo realizado por Soulhac et al., [1999], para a situação em que a direcção do escoamento é perpendicular aos desfiladeiros urbanos, mostrou que o escoamento ao encontrar o edifício se separava, voltando a misturar-se na logo após na intersecção com o desfiladeiro resultando em complicados padrões de vento.

### **2.3.3. Efeito do vento ambiente**

O efeito vento ambiente é outro problema bastante estudado na investigação do escoamento em ambiente urbano. A situação mais estudada, corresponde aquela em que a direcção do vento é perpendicular ao eixo do desfiladeiro, Figura 9, dado que muitos destes estudos visam não só a caracterização do escoamento mas também a dispersão de poluentes. Para o caso em que a direcção do vento não é transversal ao desfiladeiro, mas oblíqua, Kim and Baik, [2004], demonstraram que variações na direcção do vento podiam provocar grandes alterações nas recirculações geradas entre grupos de edifícios. Soulhac et al., [1999], investigaram a influência da direcção do vento ambiente através de simulações numéricas e experimentais e encontrou



concordâncias razoáveis entre os dados recolhidos nos dois tipos de simulações. Huang et al., [2000], verificaram que além da direcção do vento, a sua intensidade também tinha grande influência sobre os padrões de vento que se desenvolvem nestas geometrias. Kim and Baik, [2003], investigaram os efeitos da variação do nível de intensidade turbulenta no escoamento à entrada de uma geometria urbana de *aspect ratio* igual a 1. Os autores descobriram que com o aumento da intensidade turbulenta no escoamento, a velocidade de vento ao nível das coberturas dos edifícios aumentava. Estas descobertas são de grande importância, por alertarem para a grande importância, não só da direcção e intensidade do vento mas também, do nível de intensidade turbulenta definido como condição fronteira à entrada no escoamento em estudos deste tipo.

Ca et al., [1995] apresentaram resultados de simulações numéricas bidimensionais da velocidade média do vento num desfiladeiro urbano com as avenidas perpendiculares à direcção do vento, onde é incluída a transferência de calor, e é mostrada a influência que o calor originado nas ruas e edifícios circundantes tem, nos vórtices gerados pela perturbação dos edifícios no escoamento. Estes vórtices gerados nos desfiladeiros entre os edifícios, tendem a subir com o aumento da temperatura. To and Lam, [1995] mostraram resultados de experiências efectuadas em túneis de vento num desfiladeiro urbano onde a direcção do vento estava alinhada com o mesmo. Neste trabalho são discutidas as características do escoamento confinado no desfiladeiro. Resultados de medições, em larga escala sobre a cidade de *Zurich*, de flutuações turbulentas e de temperatura dentro e acima do desfiladeiro urbano, simulado em escoamento transversal, foram descritas por Rotach, [1995].

He and Song, [1999], analisaram numericamente três casos de estudo do escoamento em ambiente urbano ao nível pedestre. A área de estudo incluía edifícios de diferentes alturas inseridos numa praça. Resultados de velocidades médias, intensidades turbulentas e picos na velocidade do vento são representados e é afirmado que a aproximação numérica computacional **LES** (*Large-eddy Simulation*) é eficaz para este tipo de análise.

Feigenwinter et al., [1999], publicaram resultados de medições em larga escala que foram efectuadas sobre as flutuações de turbulência e temperatura na cidade de *Basel*. Estes dados recolhidos foram interpretados com base na teoria **MOS**, mencionada anteriormente, estando as diferenças identificadas nos resultados obtidos. Com o objectivo de perceber o fenómeno da dispersão de poluentes, Rafailidis, [1997], publicou resultados de ensaios efectuados num túnel de vento sobre uma configuração de edifícios (em 2-D) com telhados sem inclinação, e investigou o efeito que a inclinação dos topos dos edifícios e a densidade construtiva dos mesmos têm sobre o escoamento do vento na camada limite interna. Outro estudo foi ainda realizado na sub-camada rugosa (**SCR**), incluindo resultados de ensaios feitos em túnel de vento sobre uma complexa área

urbana, foram realizados por Kastner-Klein and Rotach, [2004], que estudaram tensões de corte e velocidades médias de vento geradas.

A influência que a quantidade de energia cinética turbulenta gerada tem nas características do escoamento na **CLR**, foi analisada numericamente por Kim and Baik, [2003], para o caso em que a direcção do desfiladeiro urbano é perpendicular à direcção do fluxo de vento. O problema da avaliação da velocidade média do vento sobre zonas densamente construídas foi estudado por Rotach, [2004], que propôs um procedimento para a avaliação da velocidade média do vento na **SCR**, a partir do seu valor a qualquer elevação na **CLA** correspondente.

#### **2.4. Modelos desenvolvidos para prever a intensidade do vento em ambiente urbano**

À medida que os centros urbanos se tornaram cada vez mais povoados, com níveis de poluição cada vez mais elevados tornou-se evidente a urgência na compreensão dos regimes de vento existentes, no sentido em que uma boa ventilação faz com que aumente o conforto das populações. Numa primeira fase e devido à preocupação com a dispersão de poluentes e conforto a nível pedestre, foram efectuados os primeiros estudos em laboratório com modelos à escala utilizando para isso o designado túnel de vento. O túnel de vento pode ser usado para simular um determinado escoamento de ar, sobre um modelo à escala de uma zona urbana ou sobre qualquer outro tipo de objecto onde se pretendam conhecer características do vento.

Com o avanço na área informática e com o desenvolvimento de códigos numéricos, é hoje possível a simulação virtual de mais cenários urbanos com a desvantagem de não serem tão precisos como as simulações físicas mas com a vantagem de serem mais céleres e menos dispendiosas conseguindo-se um bom acordo entre custo e benefício. Os modelos informáticos por si, não são a solução final, pois têm que ser frequentemente validados por simulação em túnel de vento. Ainda assim hoje assistimos a esforços, no sentido de aperfeiçoar e dominar parâmetros que permitam a caracterização de um determinado escoamento de vento em ambiente urbano com custos cada vez menos elevados e que sejam ao mesmo tempo cada vez mais rápidos.

##### **2.4.1. Ensaios em túnel de vento**

Deve-se ter sempre presente a grande importância de modelações físicas, à escala laboratorial (experiências em túnel de vento), que têm a vantagem de se poder controlar os parâmetros do escoamento, assim como as condições a serem aplicadas às fronteiras, e as geometrias urbanas à escala. Um tipo comum de túnel de vento é o designado túnel de vento em circuito aberto. Este tipo de túnel é normalmente composto por um tubo circular oco de elevado diâmetro. Este tubo encerra em si uma ventoinha localizada na secção de sucção do túnel. A sua designação advém de não existir colector de retorno da saída para a entrada do túnel. Assim o *hall* onde está inserido o túnel de vento é usado como canal de retorno para o escoamento. À saída do túnel de vento

existem normalmente tubos de pitot que registam a velocidade do escoamento no interior do túnel. Da velocidade medida pelos tubos de pitot é calculada a média de velocidades e esta é considerada a velocidade de referência do escoamento no interior do túnel de vento. Alguns componentes são ainda aplicados à secção de entrada do túnel de vento, no sentido de minimizarem a rotação do escoamento provocado pela rotação das pás da ventoinha. Estes componentes melhoram a uniformidade do campo de velocidades e diminuem alguma turbulência gerada. No sentido de simular de forma aproximada um perfil de velocidades semelhante ao existente em ambiente urbano, são frequentemente colocadas na secção de entrada do túnel, um conjunto de espiras triangulares (*spikes*) que permitem a geração controlada de vórtices e consequente formação de gradientes de velocidade e turbulência próximos daqueles que se pretendem recriar na secção de ensaio a jusante. É usual neste tipo de cenários a aplicação de paralelepípedos a montante da secção de ensaio no sentido de gerar a altura rugosa necessária à geração do perfil de velocidades pretendido.

Estas técnicas de modelação e os resultados que delas advêm são frequentemente utilizadas na validação de modelos numéricos [Baik et al., 2000; Sagrado et al., 2002]. Permitiram também a obtenção de informações ao nível dos padrões de vento existentes em ambiente urbano [Gayev and Savory, 1999; Pavageau and Shatzmann, 1999; Kastner-Klein et al., 2001]. As grandes desvantagens das modelações físicas à escala laboratorial são o seu elevado custo e o facto de apenas alguns casos particulares poderem ser estudados em detalhe.

#### 2.4.2. A utilização de modelos numéricos em ambiente urbano

O rápido desenvolvimento de *hardware* informático e algoritmos numéricos permitiu que técnicas de mecânica dos fluidos computacional fossem utilizadas em larga escala para o estudo e caracterização dos regimes de vento em ambiente urbano. O modelo de turbulência ***Reynolds-averaged Navier-Stokes (RANS)*** juntamente com as equações de fecho do modelo de turbulência standard  $k-\epsilon$ , é geralmente o mais usado na investigação do fluxo de ar em ambiente urbano, nomeadamente em desfiladeiros urbanos.

Nesta linha de investigação incluem-se estudos sobre, os efeitos provocados pelo *aspect ratio* ( $H/W$ ) no escoamento que atravessa o meio urbano, a configuração de edifícios, direcção do vento, intensidades turbulentas, turbulência gerada por veículos e caracterização térmica do meio construído. Existe outra aproximação ao escoamento turbulento dentro do meio urbano, designado por ***large-eddy simulation (LES)***. Este modelo pode ser utilizado, para simulação, de uma vasta gama de escoamentos turbulentos em estado transitório. Estes dois modelos têm vantagens e desvantagens e a escolha entre eles deverá resultar de um compromisso entre exactidão e custo.

Vardoulakis et al., [2003], fizeram uma revisão sobre as técnicas utilizadas nas medições de campo e nas modelações utilizadas no estudo do escoamento do vento em desfiladeiro urbano. No

entanto existe ainda pouca discussão no que toca à modelação **CFD** (Dinâmica dos fluidos computacional). Já depois desta publicação um vasto número de trabalhos foi efectuado nesta área, incluindo novas técnicas numéricas e descobertas que contribuem para um maior conhecimento do fenómeno. Com o aumento da capacidade computacional, modelos **CFD** de alta resolução tornaram-se numa ferramenta de extrema utilidade para se compreender em detalhe os processos que ocorrem em desfiladeiros urbanos. Já é exequível através de computadores de última geração simular escoamentos em zonas edificadas, à escala, utilizando parâmetros reais, tais como perfis de velocidade, temperaturas, etc., [Lee et al., 2001].

Os Modelos **CFD** são actualmente muito utilizados neste tipo de estudo, tanto no meio industrial como no meio académico. Estes podem fornecer uma aproximação relativamente económica e de elevada resolução.

Os modelos usados, podem ser classificados em duas categorias de acordo com as respectivas equações de fecho:

1. *Reynolds-averaged Navier-Stokes (RANS)*
2. *Large-eddy Simulation (LES)*

Na aproximação por **RANS**, as equações de fecho, nomeadamente o modelo  $k-\epsilon$  e as suas variantes, são introduzidas para modelar todos os movimentos fluidos onde está presente turbulência. Na aproximação por **LES**, são usadas malhas refinadas locais para modelar zonas onde se espera existir turbulência local.

#### 2.4.3. Os modelos **RANS**

Este tipo de modelo é o mais utilizado na engenharia em aplicações industriais. Estes modelos podem ser modificados para a resolução de problemas, envolvendo escoamento de vento em ambiente urbano e fenómenos meteorológicos em micro escala. São também os modelos **CFD** mais usados no cálculo de escoamento em desfiladeiros urbanos. O modelo **RANS** discutido neste capítulo é essencialmente o modelo standard  $k-\epsilon$ . Existem algumas variantes deste modelo utilizadas por diversos autores como, o modelo RNG  $k-\epsilon$ , [Kim and Baik, 2004; Li et al., 2005], o modelo Realizable  $k-\epsilon$ , [Sagrado et al., 2002], etc. Outros estudos foram efectuados para comparar as equações de fecho do modelo standard  $k-\epsilon$  com outros modelos **RANS**, como o Reynolds stress model e o Spalart-Almaras model, [Chang and Meroney, 2003].

Devido à sua robustez e eficiência computacional, o modelo standard  $k-\epsilon$  e as suas variantes são frequentemente usados no estudo do escoamento de ar em desfiladeiros urbanos. Estes foram calibrados e validados extensivamente para aplicações em engenharia, nomeadamente para escoamento de fluidos através de estruturas, [Berkowicz, 1998].

Estudos recentes usando estes modelos de turbulência, focaram o efeito da geometria urbana no escoamento, o escoamento ambiente, os fenómenos turbulentos originados pelo tráfego e os gradientes térmicos que se desenvolvem em desfiladeiros urbanos. O objectivo da presente tese não é o estudo dos gradientes térmicos nem dos fenómenos turbulentos provocados pelo tráfego, por razões já referidas.

#### 2.4.4. As limitações dos modelos *RANS*

Os modelos **RANS** são frequentemente usados na modelação de escoamentos em ambiente urbano, no entanto têm algumas limitações. Algumas destas limitações têm origem no próprio modelo tais como a natureza empírica de alguns parâmetros, a dificuldade das condições a serem impostas às paredes do domínio computacional e a incerteza de como o modelo trata a separação das várias camadas no escoamento.

Apesar do modelo de turbulência Standard  $k-\epsilon$ , ser um dos mais usados na investigação de escoamento em geometria urbana, possui algumas deficiências quando aplicado na simulação de fluidos incidentes em superfícies e na posterior separação do mesmo, Sahm et al., [2002] mostraram que modelos numéricos utilizados em ferramentas como **CHENSI**, [Sini et al., 1996], e **CFX-TASK flow**, [Raw et al., 1989], nos quais são utilizadas as equações de fecho do modelo standard  $k-\epsilon$ , permitiam reproduzir bem o padrão global do escoamento, mas subestimavam a velocidade do fluido junto das paredes (fronteiras do domínio computacional) em condições de forte intensidade do escoamento dentro do domínio. Louka et al., [2000], descobriram que quando a condição é de vento fraco, o fluxo de vento médio dentro dos desfiladeiros podia ser simplesmente a recirculação turbulenta que se estaria a desenvolver em estado transitório. Esta recirculação dentro do desfiladeiro estaria acoplada ao vento ambiente através de uma camada de corte originada ao nível das coberturas dos edifícios. Foi verificado que esta camada de corte era instável e que levava a recirculações de ar não constantes, fenómeno que fica muito além do alcance dos modelos **RANS**.

#### 2.4.5. *Large-eddy simulation (LES)*

Com os avanços tecnológicos, é possível ter computadores com maior resolução e capacidade. As fraquezas associadas com o modelo **RANS**, e a maior capacidade computacional levaram a que se introduzisse outra técnica **CFD**. **LES** foi recentemente aplicada para simular fenómenos turbulentos que ocorrem em desfiladeiros urbanos, apesar de serem ainda escassos os trabalhos que utilizam este modelo. As grandes vantagens deste modelo são a sua capacidade para lidar com escoamento transitório e variabilidade do escoamento, onde transições podem ocorrer. Este também fornece informação detalhada sobre a estrutura do escoamento turbulento, informação que não pode ser obtida através dos modelos que utilizam o esquema de fecho turbulento  $k-\epsilon$ . As simulações 2D conduzidas por Ca et al., [1995], foram provavelmente as primeiras tentativas de

modelação do escoamento urbano através do modelo **LES**. Ca et al., [1995], concentraram-se nas propriedades térmicas dos desfiladeiros urbanos e no impacto correspondente no escoamento que se desenvolve. Estes estudos eram puramente numéricos sem o suporte de resultados experimentais que os validassem. Walton et al., [2002] aplicaram o código comercial **CFX (CFD)** no estudo do escoamento para compararem a precisão dos resultados com **LES**. Fizeram medições experimentais para servirem de controlo e concluíram que as simulações efectuadas por **LES**, estavam mais concordantes com os resultados experimentais, que está em parte relacionado com o facto de através de **LES** se conseguirem determinar, de forma mais precisa, as intensidades turbulentas. Recentemente, Liu et al., [2004], e os seus colaboradores estudaram intensamente, entre vários assuntos, o escoamento em ambiente urbano utilizando vários *aspect ratios*. Efectuaram as simulações numéricas com o modelo **LES**, que incluía uma sub malha dinâmica à escala, de elementos para investigar o escoamento. Os valores usados para o *aspect ratio* foram 0.5, 1.0 e 2.0 sendo o número de *Reynolds* igual a 12000. Os autores verificaram que existiam recirculações de ar nas ruas que envolviam os edifícios, mas que eram separados do vento ambiente existente em altitudes acima das coberturas dos mesmos. Liu et al., [2004] verificaram não existir fluxo médio de ar vertical ao nível das coberturas urbanas, e que os modelos **k-ε** não tinham em linha de conta os fenómenos turbulentos transitórios que ocorrem a esta altitude. Xie e Castro, [2008], tentaram perceber a influência do número de *Reynolds*, calculado com base na dimensão dos cubos usados, na velocidade média do vento ambiente, e verificaram que esta dependência era muito fraca quando o número de *Reynolds* se encontrava no intervalo de  $R_e = 5 \times 10^3$  e  $R_e = 5 \times 10^6$ .

#### 2.4.6. Modelos matemáticos desenvolvidos para a previsão das características do vento em ambiente urbano

À medida que o tempo avança, vários investigadores procuram desenvolver modelos matemáticos cada vez menos dispendiosos e morosos, como ensaios em túnel de vento e simulações numéricas usando modelos CFD. Procurando desenvolver algoritmos, com base em correlações matemáticas encontradas por diversos autores, como é o caso do trabalho desenvolvido por, C.Georgakis; M.Santamouris, [2007]. Estes autores colheram dados experimentais em quatro cidades Gregas. Este trabalho difere ligeiramente de todos os referidos até ao momento, dado a direcção principal do vento não ser apenas perpendicular à direcção dos desfiladeiros. Estas medições foram efectuadas dentro dos desfiladeiros urbanos, entre os edifícios. Informação contendo as cidades, os parâmetros relevantes, a velocidade do vento e a sua direcção podem ser encontradas, [C.Georgakis; M.Santamouris, 2007]. Os autores utilizaram estes dados com o intuito de tentarem validar a precisão do seu algoritmo, no que toca às velocidades de vento que se desenvolvem dentro da **CL**. Ainda neste artigo pode ser encontrado um diagrama com o algoritmo para o cálculo do vento estimado no interior dos desfiladeiros. Os autores afirmaram ter conseguido estabelecer

uma relação entre o vento ambiente, não perturbado pela geometria local, e o vento dentro dos desfiladeiros, quando a intensidade do vento ambiente fosse superior a 4 m/s. Se o escoamento tivesse a direcção do desfiladeiro utilizariam as correlações desenvolvidas por Nicholson, [1975]. Quando a direcção do escoamento fosse perpendicular ou oblíqua usariam as correlações desenvolvidas por Hotchkiss et al., [1973] e Yamartino et al., [1986].

Quando a intensidade do vento ambiente era inferior a 4 m/s, os autores utilizariam métodos gráficos e estatísticos para preverem a intensidade do vento dentro dos desfiladeiros urbanos, [C.Georgakis; M.Santamouris, 2007]. Os autores afirmam ter encontrados um bom acordo entre os valores medidos e os calculados teoricamente na maior parte dos casos. Concluíram também que para velocidades do vento superiores a 7 m/s de vento ambiente, os valores estimados teoricamente poderiam estar sobre estimados. Não faço grande referência à segunda parte do trabalho, dadas as velocidades a testar não terem grande relevância em relação ao presente trabalho. A velocidade do vento de 4 m/s é normalmente a velocidade para a qual uma pequena turbina de vento entra em funcionamento.

Outra tentativa de constituir um modelo matemático que representasse as forças, tensões e velocidades desenvolvidas no escoamento em ambiente urbano foram desenvolvidas por, Lien et al., [2004]. Os autores desenvolveram uma aproximação matemática através de forças de arrasto que se desenvolvem entre os edifícios usando como ferramenta de validação ensaios experimentais em túnel de vento e cálculos de alta resolução através de modelos da dinâmica dos fluidos computacional, (CFD). Foram testados quatro modelos de turbulência, o modelo standard  $k-\epsilon$ , o modelo kato-Launder  $k-\epsilon$ , o modelo RNG  $k-\epsilon$  e o modelo não linear de viscosidade turbulenta  $k-\epsilon$ . O cenário escolhido para o ensaio consistiu num modelo à escala bidimensional de um conjunto de sete edifícios com a mesma altura e comprimento de valor igual a 150 mm. Os edifícios estavam espaçados na direcção do escoamento sendo o intervalo entre eles de 150 mm, o que significa que o *aspect ratio* era igual a 1. Segundo a revisão bibliográfica realizada, pelos autores, confirmou-se a geração de um vórtice nos espaçamentos entre os edifícios. O primeiro passo consistiu em simular em túnel de vento o modelo construído, a geração de turbulência foi conseguida graças à introdução de espiras à entrada do domínio e a altura rugosa de aproximadamente 1 mm foi conseguida através da colocação, a jusante de espiras e de pequenos cubos. Desta forma é conseguida uma boa aproximação ao perfil de velocidades médio a montante dos edifícios a ensaiar. A velocidade média de vento escolhida para uma altura igual à altura dos edifícios foi de 3 m/s. O número de *Reynolds* é calculado com base na altura dos edifícios, e na velocidade de referência já mencionada. O mesmo número pode ser calculado pela seguinte relação:

$$R_z = \frac{\rho \bar{u} D_z}{\mu} \quad (11)$$

Onde  $R_z$  é o número de *Reynolds*,  $\rho$  é a massa volúmica do ar,  $D_z$  é a altura característica que neste caso corresponde à altura do edifício e  $\mu$  corresponde à viscosidade dinâmica do ar. O valor do número de *Reynolds* encontrado foi elevado e igual a 30000. O segundo passo foi o de simular o mesmo modelo físico recorrendo a modelos computacionais que utilizam os modelos de turbulência já referidos. Os autores afirmam ter encontrado grande concordância entre os modelos **RANS** e os valores obtidos por ensaios em túnel de vento. Destacam no entanto a melhor performance obtida através do modelo não linear de viscosidade turbulenta **k- $\epsilon$** . É importante referir que os dados foram recolhidos nas zonas entre os edifícios (desfiladeiros infinitos) e acima dos mesmos. O terceiro passo foi o de constituir um novo modelo matemático que é uma aproximação por distribuição da força de arrasto. A criação desta nova aproximação matemática consiste na inclusão da força de arrasto instantânea antes da decomposição de *Reynolds* nas equações de *Navier-Stokes*. O desenvolvimento desta aproximação pode ser consultado em, [Lien et al., 2004]. A decomposição de *Reynolds* será referida no capítulo referente à modelação matemática. É importante ainda referir que o domínio de estudo está restringido à altura dos edifícios e ao espaçamento entre eles. Num primeiro método desenvolvido este novo domínio é designado por unidade de arrasto, numa segunda aproximação foi definida cada unidade de arrasto como sendo o edifício e o desfiladeiro infinito imediatamente a jusante como pode ser consultado em, [Lien et al., 2004]. Os autores concluíram que as simulações numéricas baseadas nesta aproximação matemática permitiam de forma satisfatória prever a maioria das características do escoamento que se desenvolve na *canopy layer*, e muitos dos parâmetros associados à energia cinética turbulenta. Apesar da maioria das propriedades qualitativas do escoamento poderem ser analisadas ao abrigo desta nova aproximação, os detalhes relacionados com heterogeneidade local do escoamento não podiam ser previstos. Para estes, são requeridas as simulações de elevada resolução (**CFD**). Os autores concluem ainda que o modelo de turbulência standard **k- $\epsilon$**  com uma viscosidade turbulenta linear e isotrópica, é talvez o mais completo e simples modelo passível de ser utilizado em previsões deste género. Afirmam ainda que não são necessários conhecimentos avançados sobre turbulência, bastando definir bem as condições iniciais e as condições fronteira do problema. Este modelo pode ser útil para prever as características do vento em ambiente urbano, é relativamente simples e está sujeito a pouco esforço computacional quando comparado com outros modelos de turbulência.

## 2.5. Conclusão da revisão bibliográfica

Após a revisão bibliográfica é possível ter-se uma visão generalizada do estado actual da investigação neste domínio da previsão de ventos em ambiente urbano. Desde logo é de extrema relevância separar dois conceitos base e que são muitas vezes misturados. A previsão temporal de



ventos é um conceito bem distinto, da previsão de vento local quando este é sujeito a atravessar obstáculos como sejam centros urbanos. Como referido, existem várias formas de abordar o problema. De entre as primeiras formas estão a simulação em túnel de vento de modelos à escala com o objectivo de se reproduzirem cenários reais. Ao se utilizar este procedimento temos a certeza de os resultados obtidos serem extremamente fiáveis e permitirem estabelecer algumas correlações entre o vento ambiente e o vento urbano que ainda hoje são utilizadas em determinados algoritmos desenvolvidos, [C.Georgakis; M.Santamouris, 2007]. Ao mesmo tempo este procedimento é o mais caro, mais moroso e não permite simular todo o tipo de cenários. Outro procedimento consiste em utilizar computadores, e ferramentas desenvolvidas que possam com menor custo e maior rapidez, devolver resultados de elevada fiabilidade tendo sempre presente que estes devem ser sempre validados e por ventura corrigidos com o auxílio do método anterior. Apesar de permitir uma maior variabilidade de cenários, este método é ainda bastante caro pois a maioria dos investigadores utilizam códigos comerciais já validados e testados no sentido que poderem ter resultados de grande precisão, para aplicações académicas ou industriais. Por fim a nova tendência na abordagem ao problema, consiste na utilização do primeiro e/ou segundo método como ferramenta de controlo, validação de dados e até como forma de se obterem novos parâmetros, tendo como objectivo o desenvolvimento de novos modelos matemáticos, baseados em modelos empíricos desenvolvidos no passado ou recentes, no sentido de fazer baixar o custo na resolução de problemas relacionados com a previsão de ventos nos edifícios em ambiente urbano.

### **3. Descrição do modelo numérico *Ansys CFX, Release 11***

No âmbito deste trabalho foi utilizado o modelo numérico presente no código comercial *Ansys CFX, Release 11*. Este modelo foi validado, como se poderá observar no decorrer da tese, e utilizado de forma a simular o escoamento de ar no seio de modelos à escala que tentam representar configurações urbanas. O modelo é utilizado como uma ferramenta de cálculo, no sentido de através deste se poder de uma forma muito mais rápida, quando comparando com ensaios em túnel de vento, fornecer o maior número de dados possível acerca da velocidade de vento em cima de edifícios em diferentes cenários. A exactidão dos resultados extraídos deste modelo não é o grande objectivo da presente tese, sendo no entanto feito um esforço para que estes possam ser representativos do escoamento em questão.

#### **3.1. Características gerais**

O *CFX* é uma ferramenta de cálculo com extensa aplicação em várias áreas do conhecimento. Estas áreas são tão variadas como ciências biomédicas ou aeroespaciais, aerodinâmica, modelação de processos industriais, etc. Na actualidade tem também servido como ferramenta auxiliar na compreensão de fenómenos relacionados com o escoamento em meio urbano.

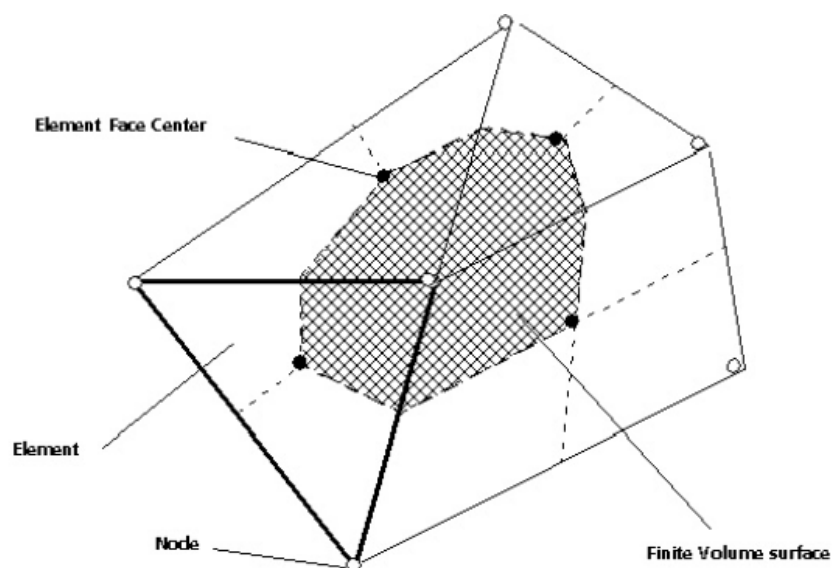
Assim é possível efectuar simulações tridimensionais ou bidimensionais de escoamento laminar ou turbulento, em estado transitório ou estacionário, de fluidos compressíveis ou incompressíveis, newtonianos ou não-newtonianos, que tentam fornecer respostas das características do escoamento com boa fiabilidade, nunca esquecendo que estes dados devem ser confrontados com dados resultantes de ensaios em túnel de vento ou mesmo resultantes de medições de campo.

Este *software* é composto por seis módulos distintos. Inclui um módulo próprio para a construção de geometrias no próprio *software* designado por *Design Builder*. Uma interface que importa geometrias com as origens mais variadas, desde *softwares* como *Solidworks*, *Autocad*, *Catia*, *Pro-E*, etc. Um módulo que permite a geração da malha de cálculo. Neste módulo a geração poderá ser efectuada através do próprio *software ansys* ou então poderá ser feita através do módulo *CFX*. No caso de se optar por efectuar simulações recorrendo ao *CFX*, existem ainda mais três módulos. Um de pré processamento, designado por *CFX-Pre 11.0*, onde podem ser definidas as condições iniciais e as condições fronteira a aplicar ao problema. O outro módulo designado por *CFX-Solver 11.0*, reúne os dados dos módulos anteriores compilados num relatório que contem toda a informação relativa às características da malha, as coordenadas e tipo de conexão dos nós, as condições de fronteira aplicadas ao domínio de cálculo, etc. Este módulo resolve iterativamente o escoamento recorrendo a equações presentes nos modelos matemáticos escolhidos previamente no módulo *Pre*. Por fim existe um último módulo que permite a visualização e o cálculo de variáveis que sejam relevantes para a caracterização de um determinado escoamento.

### **3.2. Geração da malha de cálculo**

A resolução numérica do escoamento de ar na **CLU**, implica a representação matemática por intermédio de equações diferenciais das leis que governam os fenómenos envolvidos. A informação contida na solução exacta destas equações é aproximada por um sistema de expressões algébricas definido para as variáveis em causa, num determinado conjunto de células discretas no espaço e no tempo que definem o domínio em análise. A geometria deste domínio é discretizada num conjunto de células computacionais ou de cálculo que permitem definir a malha de computação, sendo o grau de discretização função da dimensão do domínio de cálculo e da resolução pretendida.

No caso do *CFX* esta aproximação envolve a discretização do domínio numa malha composta por volumes de controlo finitos. As equações governantes são integradas em cada volume de controlo, de forma a que as quantidades relevantes (massa, momento, energia, etc.) sejam conservadas em cada volume de controlo ou célula. A figura a seguir representada mostra um elemento de malha típico de comprimento unitário, de forma a que seja bidimensional, onde uma superfície do volume de controlo aparece sombreada.



**Figura 11 - Volume de controlo onde se evidencia uma superfície do mesmo**

Cada nó está rodeado por uma série de superfícies que definem o volume de controlo. Todas as soluções das variáveis e as propriedades dos fluidos estão armazenadas nos nós que constituem os elementos. Informação mais detalhada poderá ser consultada em, [Ansys Inc., 2007].

No início da modelação numérica computacional, a discretização do domínio de cálculo era feita recorrendo à utilização de elementos regulares (hexaédricos) dado que o âmbito da sua aplicação era restrito a geometrias simples, [Amorim, 2003]. Actualmente estas ferramentas de cálculo evoluíram de tal ordem que permitem ao utilizador a discretização de domínios complexos, através de elementos tetraédricos, hexaédricos, piramidais, etc., garantindo uma maior resolução nos resultados e eventualmente uma maior performance de cálculo. Assim o *software* utilizado permite a discretização de geometrias mais ou menos complexas no caso tridimensional. Caso se pretendam efectuar simulações bidimensionais deverão ser utilizadas células de espessura unitária, como já referido. A título de exemplo podemos visualizar a geração de malha estruturada, na Figura 12, com elementos hexaédricos, e não estruturada, na Figura 13, com elementos tetraédricos.

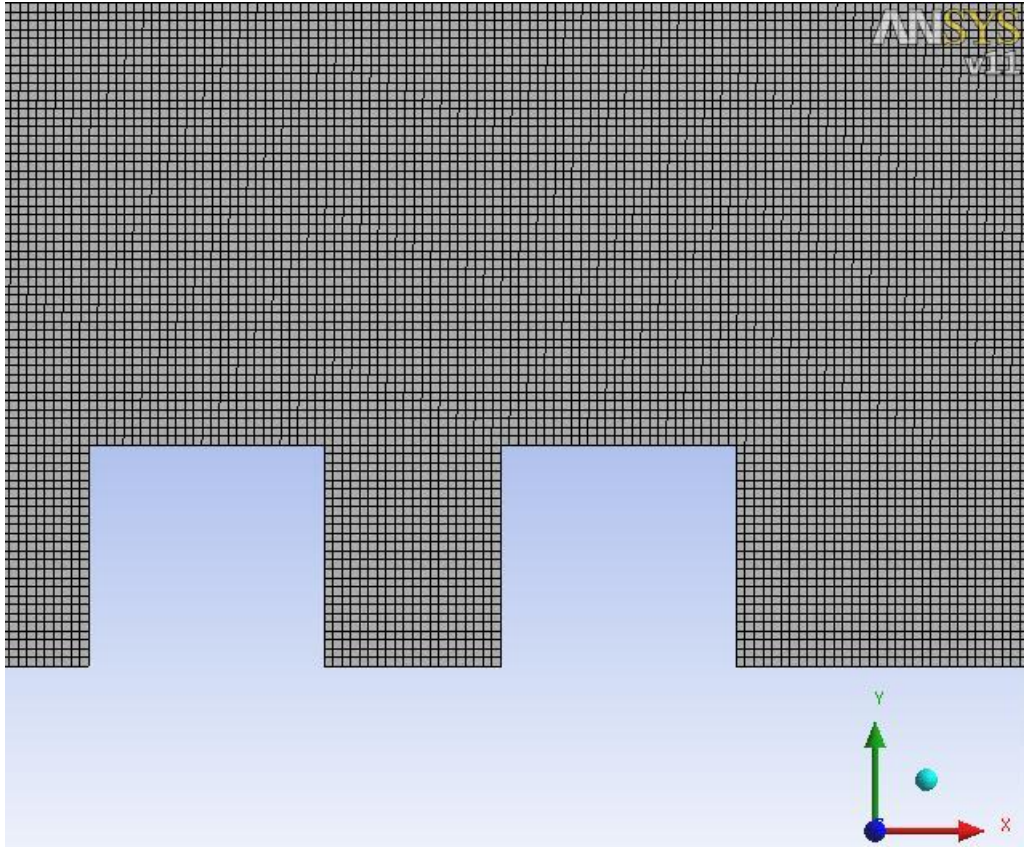
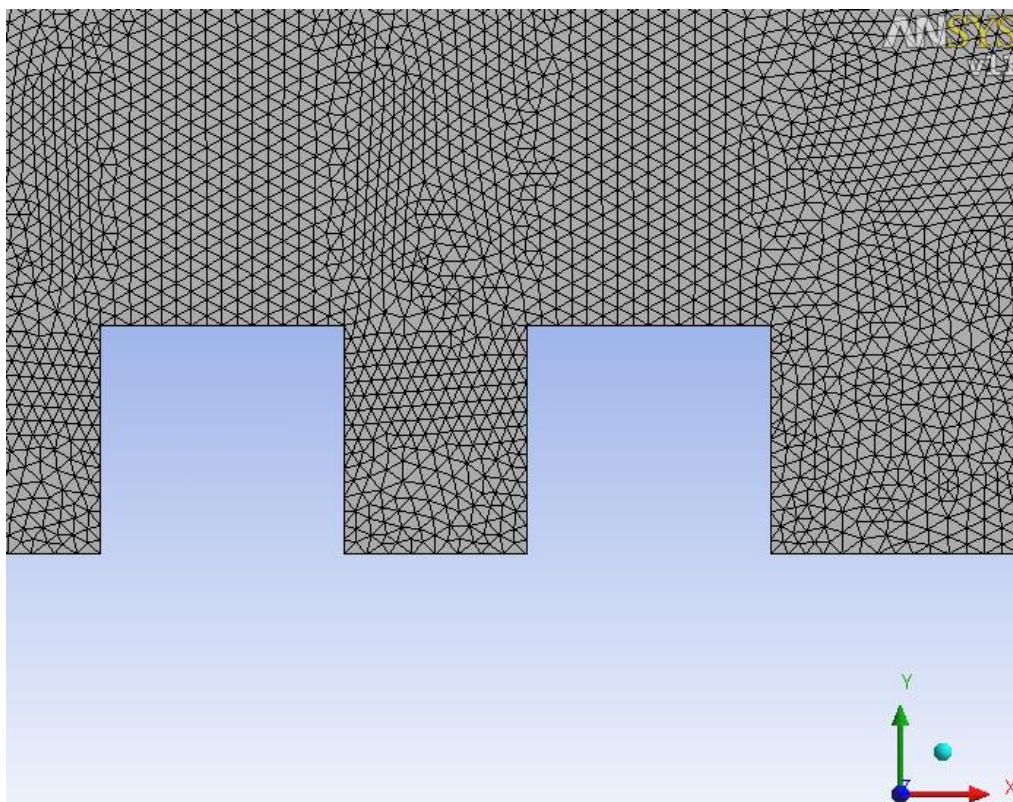


Figura 12 - Discretização de um domínio de cálculo utilizando malha estruturada



**Figura 13 - Discretização de um domínio de cálculo utilizando malha não estruturada**

Com a introdução de malhas tetraédricas é possível atingir níveis de refinamento superiores, relativamente à utilização de malhas estruturadas, [Amorim, 2003].

É expectável que, o aumento do número de volumes de controlo num domínio discretizado com malha não estruturada, possibilite maior resolução nos resultados obtidos. No entanto esta afirmação nem sempre é verdade como irei demonstrar. Na maior parte das situações uma fraca discretização do domínio em zonas de estudo críticas podem levar a maus resultados e por sua vez a uma má interpretação do seu significado físico. Por isso é importante ter o cuidado de ao malhar um domínio não descurar as zonas relevantes para o problema. Na sub camada rugosa a forte interacção, entre o vento médio e os obstáculos, resulta num aumento da viscosidade o que implica um aumento de turbulência e consequente formação de turbilhões (*eddies*). Assim a malha deverá ser tão refinada quanto possível nos locais onde se possa suspeitar de tais fenómenos. Uma eficaz revisão da literatura poderá ajudar a identificar tais fenómenos e sua mais provável localização.

Uma boa configuração de malha proporciona uma melhor e mais rápida convergência no que toca aos erros residuais calculados entre iterações. Neste tipo de simulação a discretização do domínio deve assentar em alguns pressupostos, [Mertens S., 2006]:

- As regiões onde existam elevados gradientes das grandezas físicas que representam o escoamento, necessitam ser discretizadas com um grande número de volumes de controlo que sejam tão pequenos quanto possível
- O fluxo de ar, através dos elementos de malha, deverá ser normal às faces de entrada e saída dos elementos
- Malhas não uniformes deverão ter uma taxa de crescimento baixa ( $< 1.2$ )

O *software Ansys* possibilita a discretização do domínio através de malha estruturada e não estruturada. A malha estruturada tem que ser definida pelo utilizador, enquanto que a malha não estruturada é normalmente gerada de forma automática. Dado que a geração de malha estruturada é consumidora de tempo, a geração de malha não estruturada é, por assim dizer, à partida mais apetecível e interessante. No entanto a malha não estruturada pode causar ângulos consideráveis entre a direcção do escoamento não perturbado e a direcção normal às entradas e saídas dos volumes de controlo o que tem como consequência a geração de erro. Em cada volume de controlo, os componentes da velocidade do fluido são calculados e representados nas superfícies dos volumes de controlo com uma precisão finita, figura 11. Esta precisão finita, no cálculo, traduz-se muitas vezes na designada viscosidade numérica ou difusão numérica, porque tem o mesmo efeito que a viscosidade do fluido no que toca à introdução de erros.

Uma solução obtida por simulação numérica deve ser independente da malha, ou seja a malha deve ser refinada o suficiente para que não influencie os resultados de cálculo. A independência de malha pode ser verificada através da simulação numérica do escoamento no domínio discretizado com malhas de tamanho diferente. Assim a independência de malha é conseguida quando os resultados das variáveis convergem e são iguais independentemente do tamanho da malha. Este método é também consumidor de tempo, mas necessário, [Mertens S., 2006].

### **3.3. Descrição do modelo matemático utilizado**

A investigação aerodinâmica pode ser baseada em três procedimentos. Modelos matemáticos, medições experimentais ou cálculos resultantes de simulações da dinâmica dos fluidos computacional. Estes procedimentos constituem a base do conhecimento aerodinâmico dos nossos dias, e são usados como ferramentas de análise como no caso da presente tese. Como referido anteriormente todos estes procedimentos possuem vantagens e desvantagens e a aplicação de cada um deles deve estar de acordo com o objectivo de cada tipo de análise.

As medições experimentais e os cálculos resultantes da dinâmica de fluidos computacional (CFD), fornecem valores (dados). Para que exista coerência entre os dados obtidos e explicação física dos fenómenos observados, são necessários modelos matemáticos. Por seu lado os modelos matemáticos também necessitam de medições experimentais e de cálculos CFD. Estes devem verificar as suposições do modelo matemático. Medições experimentais precisas são por vezes

difíceis de obter. Nesse caso, essas medições podem ser obtidas através simulações numéricas, [Mertens S., 2006].

As equações de *Navier-Stokes*, descrevem o comportamento do fluido, [Batchelor, G.K., 1988]. No entanto são de difícil aplicação dada a sua natureza complexa. Felizmente, parte dos escoamentos podem utilizar aproximações destas equações tornando o modelo matemático mais simples. Se for assumido que um determinado tipo de escoamento é homogéneo e invíscido as equações de *Navier-Stokes* podem ser simplificadas através das equações de *Euler*, [White F. M., 1994].

Se um determinado tipo de escoamento tiver um elevado número de *Reynolds* e a sua velocidade não perturbada for inferior a 30% da velocidade do som, que no caso de o fluido ser ar corresponde a 341 m/s. O fluido pode ser tratado como incompressível, [Batchelor, G.K., 1988]. Assim as equações de *Euler* podem ser utilizadas para caracterizarem o comportamento do fluido, excepto em pequenas camadas limite que se situem junto de corpos, como no caso dos cenários em estudo na tese actual.

Os cálculos através de **CFD**, são usados para verificar os resultados de modelos matemáticos e ensaios em túnel de vento. Este tipo de cálculo computacional avalia as equações que governam o escoamento do fluido num domínio de estudo que está subdividido em volumes finitos ou células que constituem a malha. Existem diferentes aproximações para as equações que governam o escoamento ou para o tipo de modelo de turbulência utilizado que podem diminuir o esforço computacional para resolver as equações que regem um determinado tipo de escoamento. Os constrangimentos podem residir então na escolha do modelo de turbulência e na configuração da malha.

Na simulação de um cenário urbano, é importante que durante a modelação geométrica do mesmo seja tal que permita que o escoamento se desenvolva permitindo a separação das várias sub camadas limite, ao mesmo tempo temos de ter sempre presente que para se conseguirem valores representativos do escoamento e de elevada resolução quando estes atravessam obstáculos como edifícios, a malha utilizada junto aos mesmos de ser de tal forma refinada que permita elevada precisão nos cálculos efectuados por **CFD**. Por outras palavras é necessário que o domínio de estudo tenha dimensão suficientemente grande relativamente à escala dos edifícios e que permita a que o escoamento se desenvolva completamente, tendo ao mesmo tempo elevada precisão de cálculo e que implica um grande refinamento dos volumes finitos que constituem a malha (domínio de calculo). Isto significa que mesmo para os computadores mais rápidos dos nossos dias este tipo de cálculo possa ser muito moroso. Assim aproximações das equações que regem o escoamento são necessárias para que se possa reduzir o esforço computacional.

As equações aproximadas podem ser encontradas com o procedimento a seguir descrito. As equações (*Navier-Stokes*) que regem o escoamento, podem ser rescritas fazendo uma decomposição das suas componentes numa componente média e numa componente flutuante.

A título de exemplo, podemos rescrever a velocidade instantânea que pode ser decomposta da seguinte forma:

$$u_i = \bar{u}_i + u_i^f \quad (12)$$

Onde  $\bar{u}_i$  representa a componente da velocidade média e  $u_i^f$  representa a componente flutuante. Esta decomposição é utilizada para a velocidade, pressão e temperatura e é designada por decomposição de *Reynolds*. Deste tipo de decomposição resultam as equações médias de *Reynolds*. Transpondo o mesmo conceito para as equações de *Navier-Stokes*, resultam as designadas *Reynolds Averaged Navier-Stokes (RANS)*. As equações **RANS** mostram o aparecimento de novos termos desconhecidos, como  $\overline{u_i^f u_j^f}$  o que significa que as equações não estão fechadas, i.e. surgem mais incógnitas. Estes novos termos que resultam da decomposição designam-se por tensões de *Reynolds*, e têm que ser modelados através dos designados modelos de turbulência de forma a se conseguir o fecho das equações **RANS**. Vários modelos turbulentos podem ser encontrados na literatura, [White F. M., 1994], onde pode ser encontrada informação sobre as vantagens e constrangimentos de cada um dos modelos existentes. Vou a seguir referir apenas o modelo de turbulência, utilizado na simulação **CFD**, utilizado na presente tese.

### 3.3.1. O modelo de turbulência *Standard k-ε*

Este foi o modelo de turbulência escolhido, dado que é um modelo já muitas vezes testado e verificado usado de forma transversal tanto em aplicações industriais como académicas e também porque necessita de um reduzido esforço computacional que é um dos requisitos da presente tese dado o número elevado de cenários a simular.

No modelo *k-ε*,  $\overline{u_i^f u_j^f}$  é modelado de acordo com o esquema de fecho de *Boussinesq*<sup>1</sup>. Analogamente à relação constitutiva<sup>2</sup>, este esquema de fecho turbulento calcula  $\overline{u_i^f u_j^f}$  a partir dos gradientes locais de velocidade, [Tennekes et al., 1972] e [Nieuwstadt, F.T.M., 1992].

<sup>1</sup> O esquema de fecho de *Boussinesq* é também conhecido como *K-theory*.

<sup>2</sup> Relação matemática entre as tensões de corte presentes no fluido e os gradientes de velocidade gerados.



$$-\overline{\rho u_i' u_j'} = \mu_t \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \left( \rho k + \mu_t \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} \right) \delta_{ij} \quad (13)$$

Onde a convenção de *Einstein* é usada e  $\mu_t$  é a viscosidade turbulenta,  $k$  é a energia cinética turbulenta e  $\delta_{ij}$  é o *Kronecker-delta*<sup>3</sup>. A viscosidade turbulenta  $\mu_t$  é assumida como sendo isotrópica e pode ser calculada através da equação (14).

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (14)$$

Onde  $C_\mu = 0.09$  é assumido constante e  $\varepsilon$  é a taxa de dissipação turbulenta. Este é o modelo mais simples a composto por duas equações de transporte, deduzidas a partir das equações de Navier-Stokes (equação da continuidade e de momento) que constituem a formulação teórica deste modelo. Utiliza uma equação (15) de transporte para  $k$ , e uma equação (16) de transporte para  $\varepsilon$  que são resolvidas a partir de um fecho de turbulência de primeira ordem.

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U} k) = \nabla \cdot \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + P_k - \rho \varepsilon \quad (15)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U} \varepsilon) = \nabla \cdot \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right] + \frac{\varepsilon}{k} (C_{\varepsilon 2} P_k - C_{\varepsilon 1} \rho \varepsilon) \quad (16)$$

$\mathbf{U}$  é o vector velocidade em coordenadas cartesianas,  $\rho$  é a massa volúmica do fluido,  $\mu$  é a viscosidade do ar, e os valores constantes deste modelo de turbulência são por defeito os sumarizados na seguinte tabela.

Tabela 3 - Constantes do modelo de turbulência  $k - \varepsilon$

$C_{\varepsilon 1}$	$C_{\varepsilon 2}$	$C_\mu$	$\sigma_k$	$\sigma_\varepsilon$	$\sigma_p$
1.44	1.92	0.09	1.0	1.3	0.7

Para a validação numérica assim como para a resolução do problema em questão foram utilizadas simulações numéricas em código comercial *Ansys CFX, Release 11*.

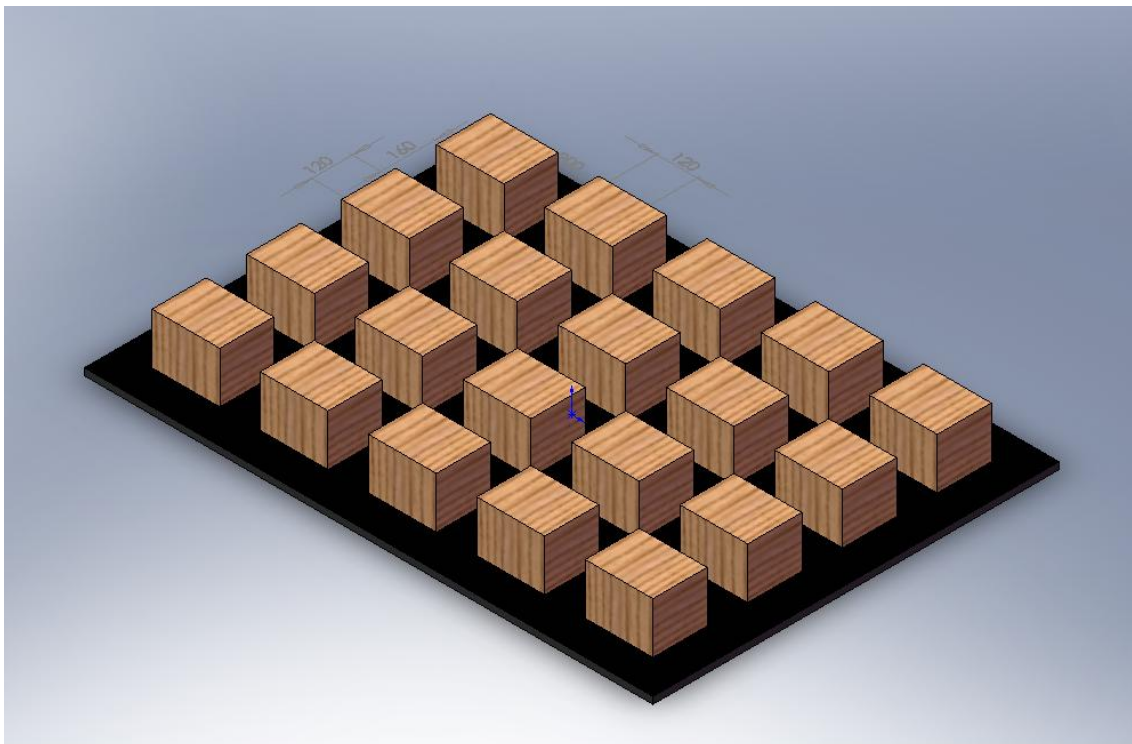
### 3.4. Validação numérica dos resultados experimentais em túnel de vento

No sentido de se poder averiguar intensidades de vento em ambiente urbano nomeadamente acima dos topos dos edifícios dentro da subcamada limite rugosa (**SCR**), recorreu-se a resultados de simulações em túnel de vento realizadas por Ricciardelli et al., [2006]. Os autores verificaram que as características do escoamento dentro desta subcamada limite eram diferentes das camadas

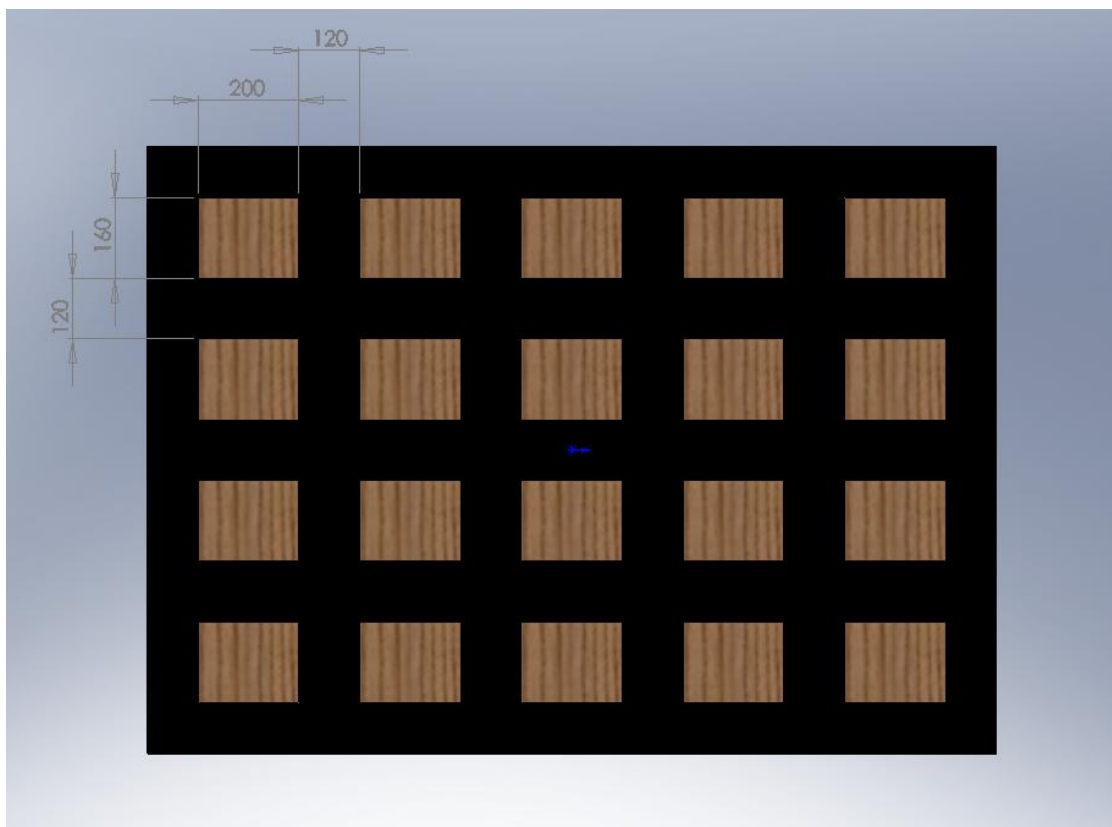
<sup>3</sup>  $\delta_{ij} = 1$  se  $i = j$ , ou  $\delta_{ij} = 0$  se  $i \neq j$

superiores inseridas na camada limite urbana, onde o escoamento é mais afectado pela geometria local do que pela transferência de energia entre a **SCR** e a **CLU**.

Para tal efectuaram medições de velocidade do vento nos desfiladeiros urbanos de um modelo à escala representando um padrão de construção ortogonal, figura 11. O modelo é constituído por 20 prismas de madeira com dimensões **20 × 16 cm** no plano de topo (Figura 12) e **15 cm** de altura. O espaçamento entre eles é de **12 cm**, como se pode verificar nas Figuras 11 e 12. Neste ensaio a direcção do vento é perpendicular ao desfiladeiro urbano, tal como na Figura 10.



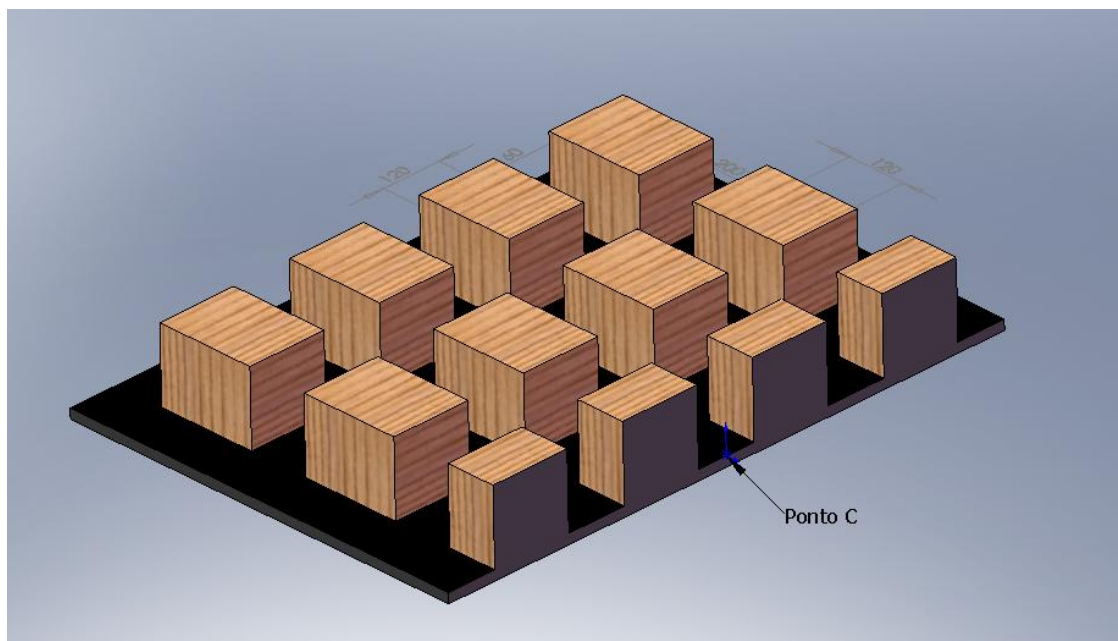
**Figura 14 - Modelo à escala utilizado para simulações em túnel de vento**



**Figura 15 - Vista de topo do modelo utilizado com as dimensões em milímetros**

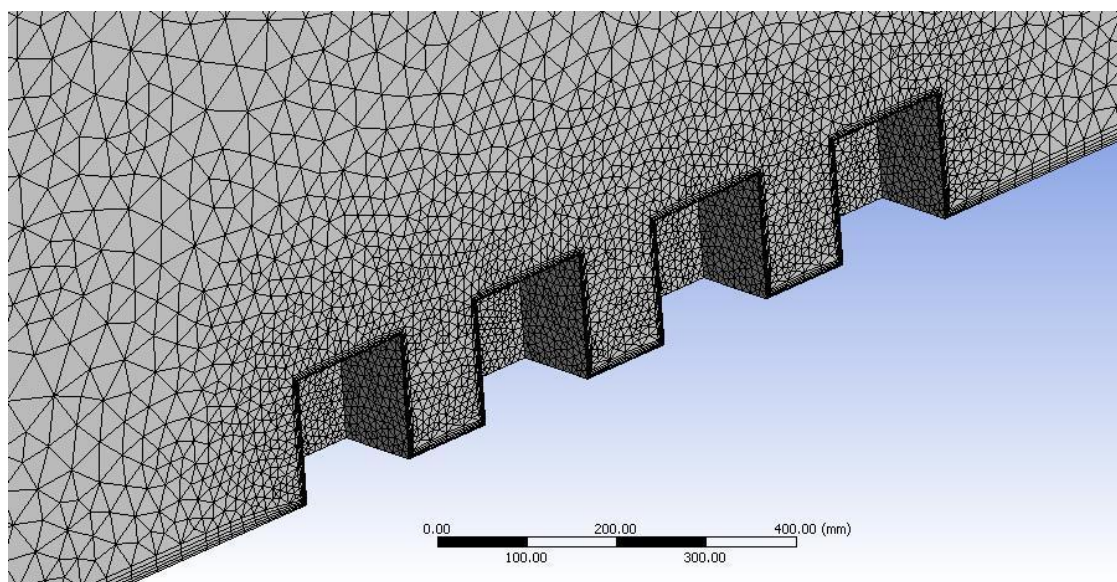
Na figura 13, está representado em corte o modelo físico do cenário urbano testado em túnel de vento. Nesta figura está representado o **Ponto C** que foi utilizado na validação das simulações numéricas que irão ser apresentadas no decorrer da tese.

Ricciardelli et al., [2006], retiraram valores deste ponto a várias alturas, sendo que da união destes pontos surge uma linha normal à base do modelo. Os autores efectuaram dois ensaios relativamente a este ponto, sendo que num deles não era induzida turbulência. O ensaio utilizado para validação numérica do modelo computacional corresponde ao ensaio em túnel de vento onde não é gerada turbulência como condição inicial à entrada do domínio de teste, dado que a sua introdução iria trazer maior complexidade à validação numérica do ensaio realizado em túnel de vento.



**Figura 16 - Vista em corte do modelo, onde se pode visualizar o ponto C**

Na figura 17 podemos observar em corte, a discretização efectuada do modelo tridimensional utilizado para a validação numérica do ensaio experimental. Foi utilizada malha tetraédrica, tendo sido aplicado um refinamento local na proximidade dos edifícios e do solo de forma a conseguir elevada resolução nos resultados.



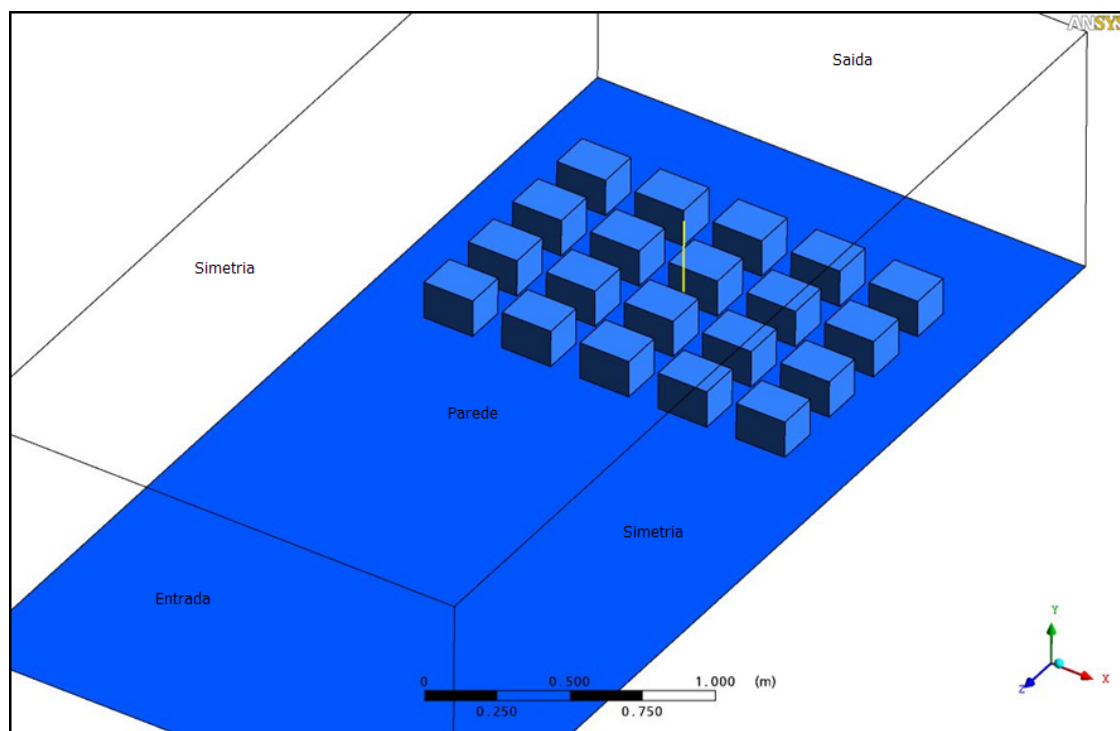
**Figura 17 - Vista em corte da malha tetraédrica aplicada no domínio computacional e em redor dos edifícios**

Os pontos utilizados, tanto no ensaio em túnel de vento como na simulação numérica, correspondem aos pontos que constituem a linha a amarelo que pode ser visível na Figura 18.

#### **3.4.1. Simulação numérica tridimensional do modelo simulado em túnel de vento**

No sentido de se proceder à validação dos resultados numéricos, a mesma geometria foi modelada através de um *software CAD*. Essa geometria corresponde agora ao domínio computacional que foi discretizado através de elementos tetraédricos não estruturados. Não foi possível a discretização do domínio através de malha estruturada com elementos hexaédricos. Um refinamento local junto das zonas críticas, na parede e em torno dos edifícios foi realizado no sentido de conseguir elevada resolução nos resultados nestas zonas críticas, principalmente nos desfiladeiros urbanos onde é gerada grande turbulência. Após a discretização do domínio foram aplicadas condições de fronteira no mesmo e que serão descritas a seguir. Foi simulado o mesmo modelo utilizado em túnel de vento no caso em que não era induzida turbulência no escoamento à entrada do domínio computacional, sendo a intensidade do vento constante e igual a 10 m/s. Na simulação numérica, à entrada, foi usada esta condição de fronteira de velocidade imposta de modo a se poder comparar com a simulação em túnel de vento no caso mais simples em que não é induzida turbulência à entrada do domínio de teste. Assim pretende-se verificar se o modelo numérico corresponde ao modelo simulado em túnel de vento, utilizando para isso condições iniciais simples dada a natureza complexa do problema.

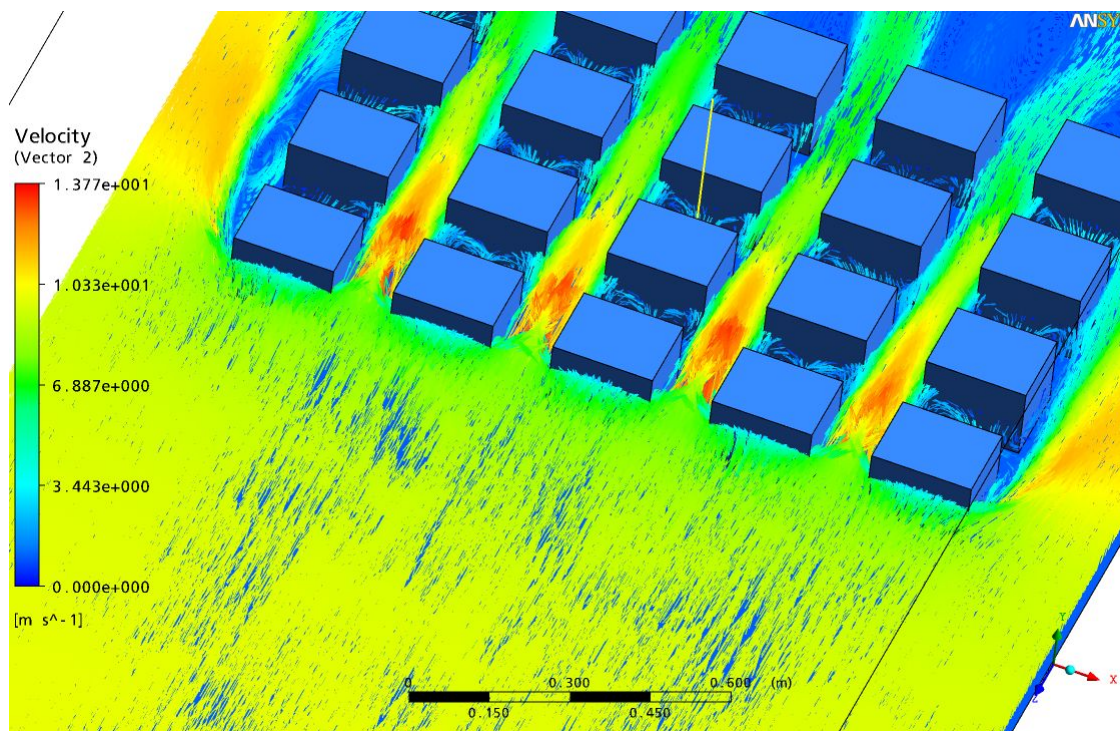
Para a secção de saída do domínio de cálculo e para a secção oposta à base dos edifícios (parede), utiliza-se a condição de fronteira de gradiente de pressão nulo onde o parâmetro a definir é a pressão relativa do ar na direcção normal à secção. Nas interfaces que correspondem às paredes laterais do domínio de cálculo (planos de simetria), foi utilizada a condição fronteira de fluxo nulo que traduz a inexistência de tensões de corte geradas pelas paredes sobre o escoamento de ar. A condição fronteira na zona inferior do domínio que corresponde ao solo e às fachadas dos edifícios em estudo foi definida como sendo uma superfície sólida, ou seja, foi considerada uma condição de não escorregamento.



**Figura 18 - Vista do domínio computacional, onde a linha a amarelo corresponde à elevação do ponto C ao longo do eixo yy onde foram registados dados de velocidade**

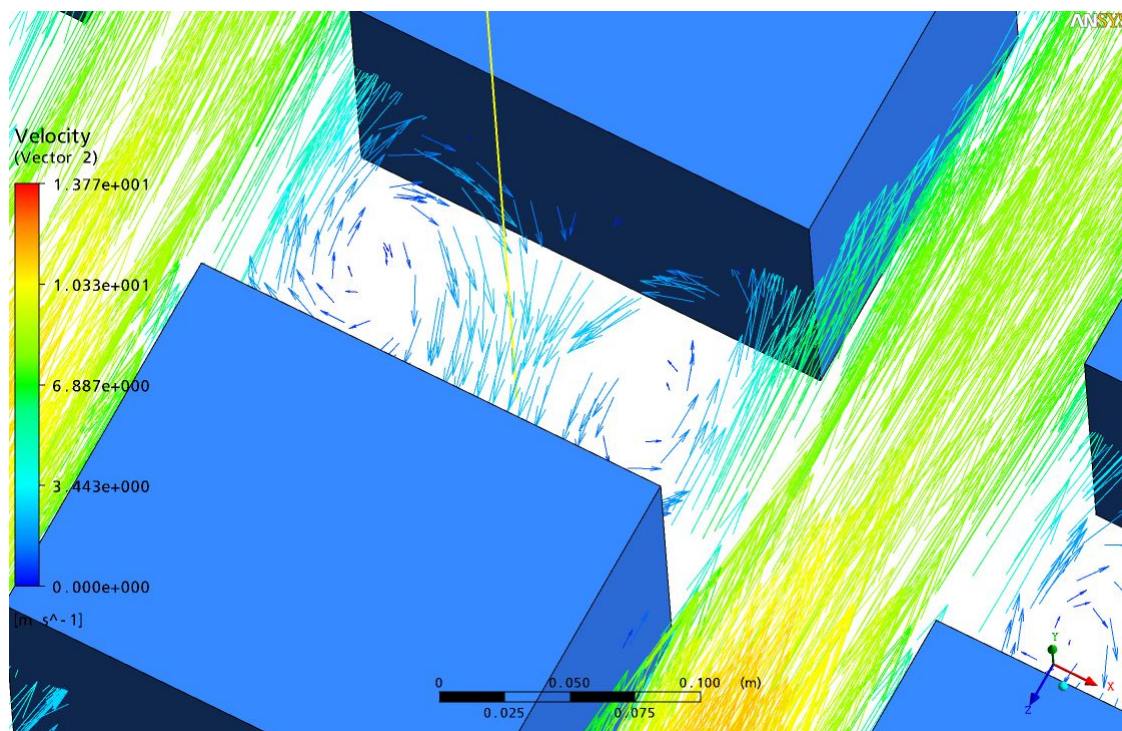
Na Figura 19, podemos visualizar o campo de velocidades que se desenvolve no plano que intersecta os edifícios a meia altura. Como previsto é visível a aceleração do vento quando este é canalizado para os canais existentes, entre os blocos, que estão no sentido do escoamento. A jusante do conjunto de edifícios pode-se observar o efeito de sombra provocado pelos mesmos à passagem do escoamento. Esta zona corresponde à esteira gerada pela resistência dos edifícios ao fluido.





**Figura 19 - Visualização dos vectores velocidade do vento traçados num plano que intersecta os edifícios a meio da sua altura**

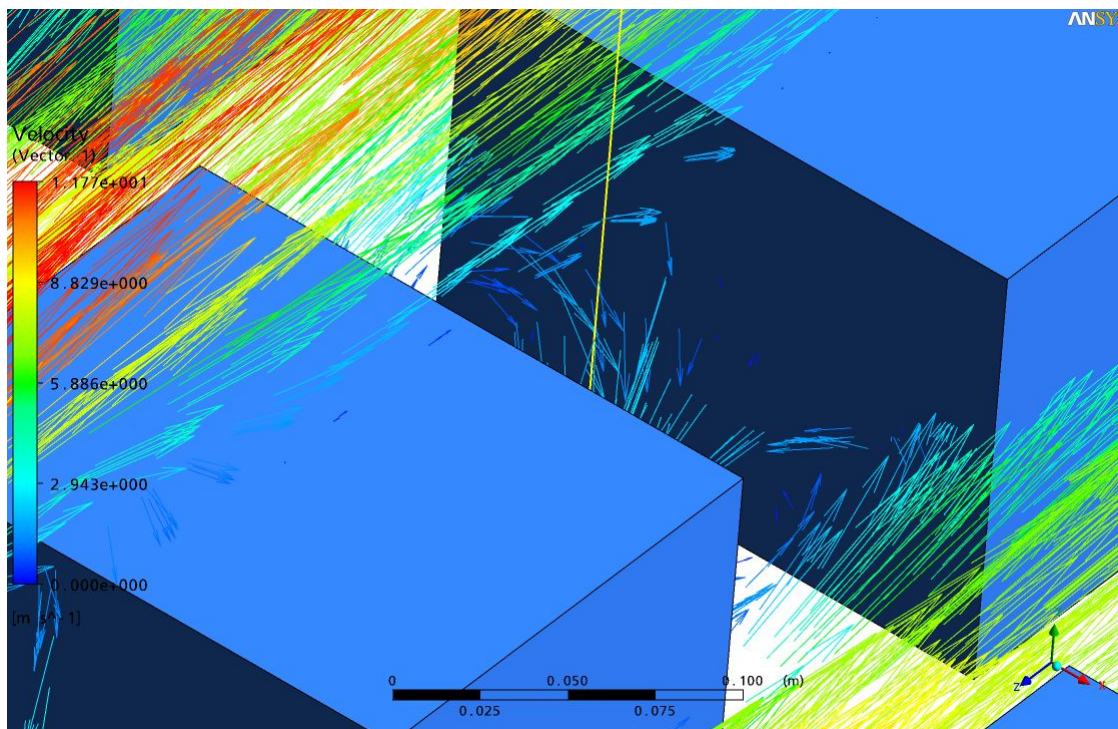
Na Figura 20, no plano que intersecta os edifícios a meia altura na zona do desfiladeiro urbano, podemos visualizar a formação de dois vórtices em contra rotação provocados pela geração de turbulência.



**Figura 20 - Visualização de dois vórtices em contra rotação no plano a meia altura dos edifícios**

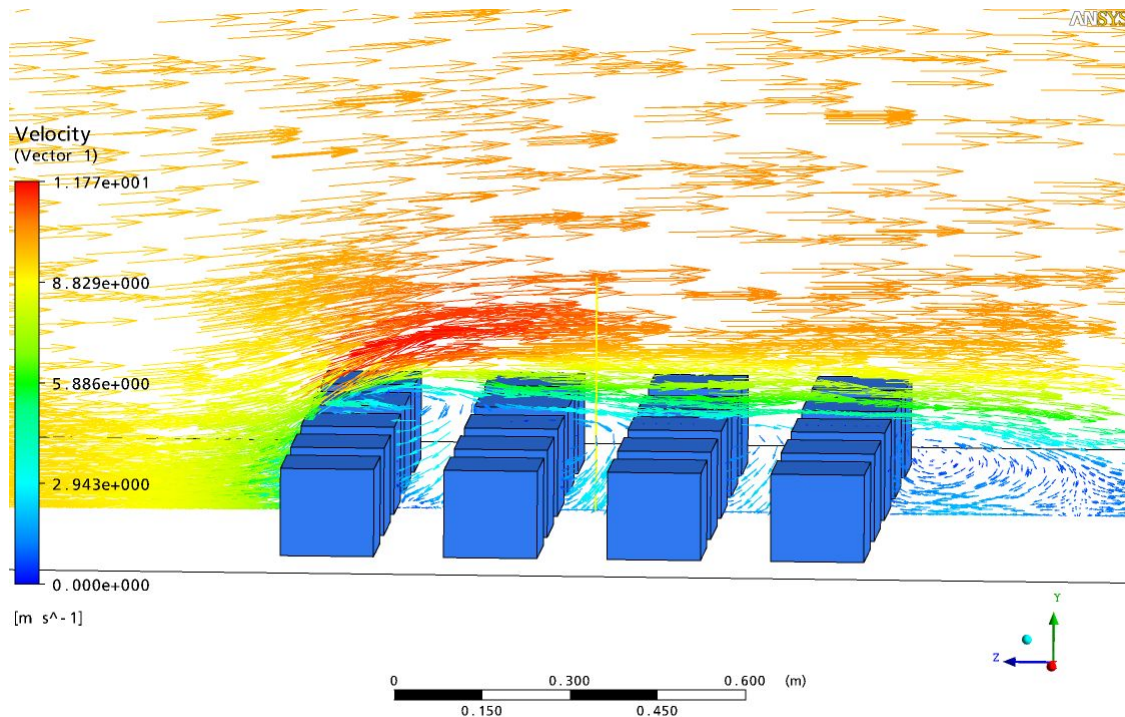
Na Figura 21, são representados dois planos. O primeiro corresponde ao plano em **XZ** a meia altura dos edifícios, enquanto que o segundo plano corresponde ao plano que é perpendicular ao anterior estando situado **YZ** a meia largura dos edifícios. Nesse plano é também visível a geração de um vórtice que circula no sentido horário.





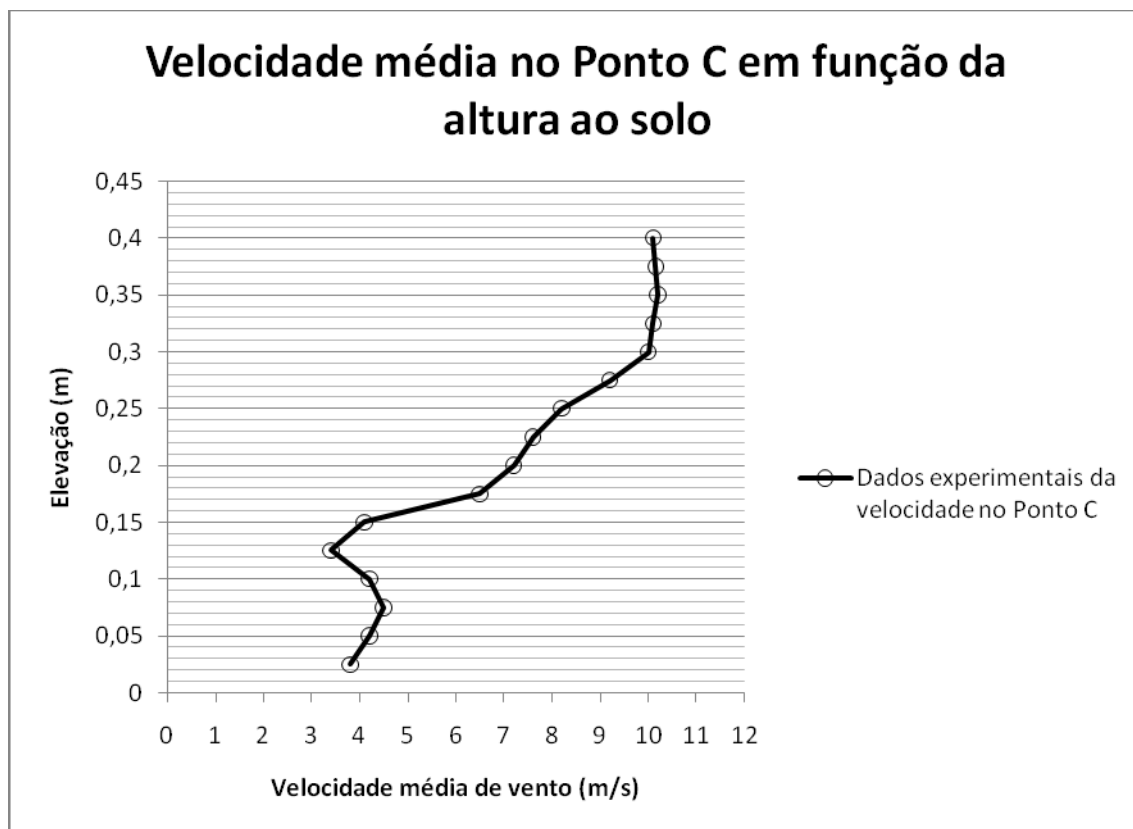
**Figura 21 - Visualização da figura 17, com a inserção de um novo plano em YZ, perpendicular ao anterior, onde estão representados vectores da velocidade do vento nesse plano**

Na Figura 22, é visível a aceleração que o fluido sofre em altura após encontrar a primeira barreira de blocos, fenómeno já anteriormente reportado na revisão bibliográfica.



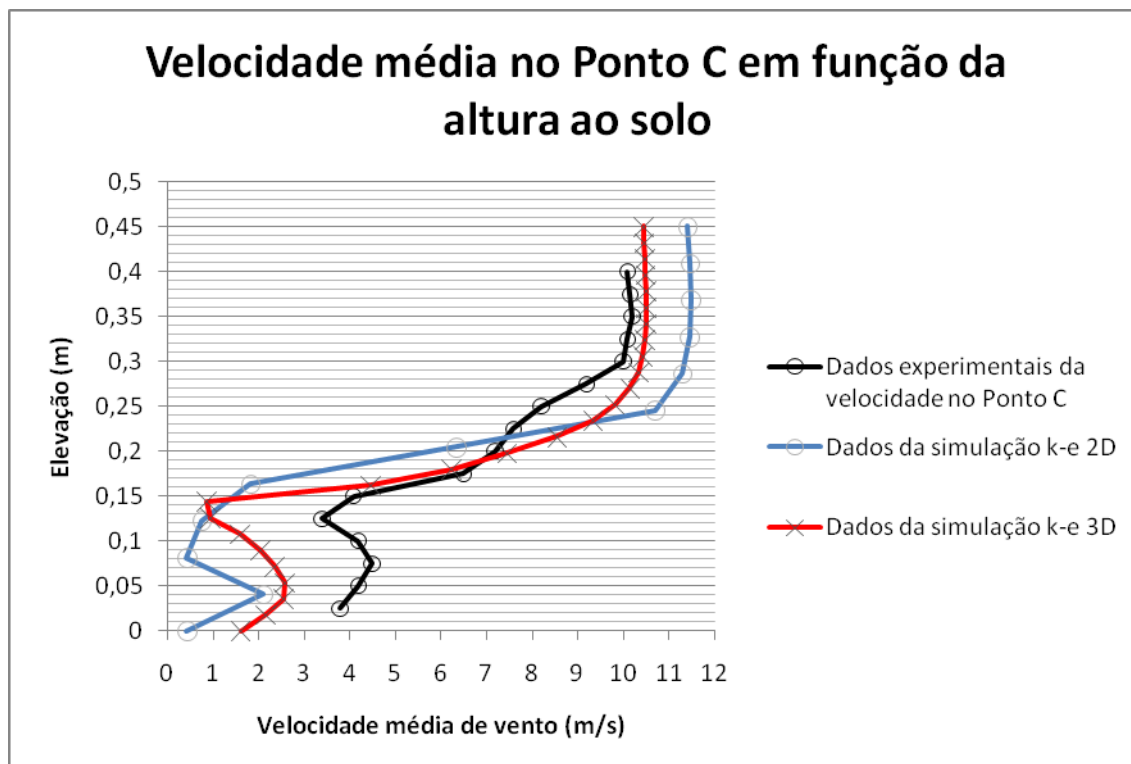
**Figura 22 - Visualização do plano em YZ, com a respectiva representação dos vectores velocidade do vento**

Em túnel de vento a intensidade do vento foi registada nos vários pontos que constituem a linha a amarelo visível nas Figuras 19,20 e 21 para um escoamento com velocidade imposta normal à entrada do domínio. Foram retirados dados de velocidade nos pontos que constituem esta linha, dado que a mesma se encontra no desfiladeiro urbano que é a zona onde se desenvolve maior turbulência. Estes valores, obtidos experimentalmente em túnel de vento por Ricciardelli et al., [2006], podem ser visualizados na Figura 23.



**Figura 23 - Dados obtidos em túnel de vento no ponto C em função da altura ao solo**

Na tentativa de se validar o modelo numérico, no sentido de se prosseguir com o objectivo da tese, tentou-se reproduzir a experiência realizada em túnel de vento e os resultados estão apresentados na Figura 24. Na simulação tridimensional do geometria que corresponde ao modelo testado em túnel de vento, a intensidade do vento acima dos edifícios quase que coincide com os resultados experimentais. Ficando um pouco aquém na zona correspondente ao desfiladeiro urbano, para uma altura entre os 0 e os 0.15 metros. Foi também realizada uma simulação numérica bidimensional do escoamento. O domínio seleccionado corresponde a uma fatia da geometria tridimensional no plano **YZ** que intersecta os edifícios a meio da sua largura e passa pela linha onde são recolhidos os dados.

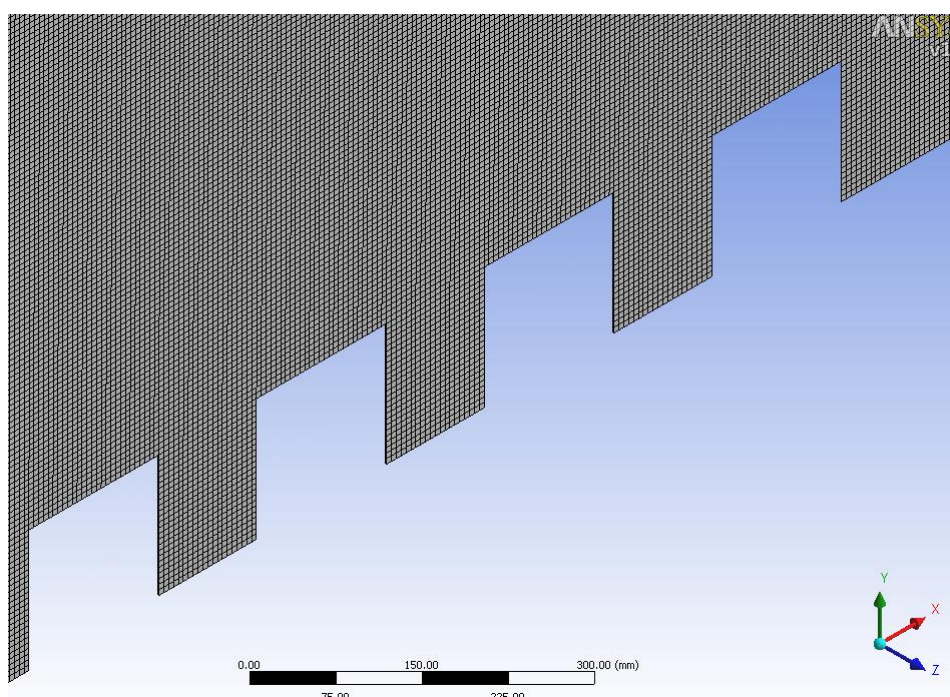


**Figura 24 - Comparação entre os dados obtidos experimentalmente com dados obtidos por simulação numérica a duas e três dimensões**

### **3.4.2. Simulação numérica bidimensional do modelo simulado em túnel de vento**

Dado a complexidade do escoamento em questão e a necessidade de se efectuar um grande número de simulações numéricas com cenários onde variam as alturas dos edifícios a montante do último edifício, onde se irão recolher dados de velocidade de vento que servirão de treino a uma rede neuronal. Foi necessário simplificar o modelo numérico através de simulações bidimensionais, no sentido de verificar se estas de certa forma representavam aproximadamente o perfil de velocidades que se desenvolve no desfiladeiro urbano. As simulações bidimensionais comportam um custo inferior de tempo relativamente às tridimensionais e permitem apenas a simulação da direcção do vento numa determinada direcção, diminuindo desta forma a variabilidade de cenários possíveis. A direcção do vento foi escolhida como sendo perpendicular ao desfiladeiro urbano (infinito). Apesar da discretização da malha do domínio tridimensional ter sido realizada com elementos do tipo tetraédrico, a discretização da malha do domínio escolhido para a simulação bidimensional foi realizada com malhas tetraédricas, Figura 25, e hexaédricas, Figura 26. Na geração de malha em ambos os casos foi escolhida uma espessura unitária para os elementos de malha de forma a garantir que as simulações fossem bidimensionais (recomendação do *software*). Antes de se proceder à apresentação dos cenários simulados para o treino de uma rede neuronal foram efectuados estudos de dependência de malha e estudos de vários tipos de malha no sentido

de perceber qual o tipo de malha que melhor representa os escoamentos desta natureza. Tendo definido que a abordagem ao problema passaria por simulações bidimensionais, nos pontos que se seguem os dados foram obtidos a partir de simulações bidimensionais do modelo geométrico, utilizado na simulação numérica tridimensional e em túnel de vento no sentido de averiguar se os dados recolhidos da intensidade do vento nas zonas de maior turbulência, seriam aproximadamente os mesmos independentemente do tipo de simulação escolhido. Da geometria tridimensional gerada para simulação foi escolhida agora, uma fatia no plano **YZ** que intersecta os edifícios a meio da sua largura e passa pela linha onde são recolhidos os dados. As condições de fronteira escolhidas são as mesmas, sendo por isso iguais às da simulação tridimensional, e foram aplicadas nas secções equivalentes.



**Figura 25 - Discretização do domínio bidimensional com malha estruturada homogénea**



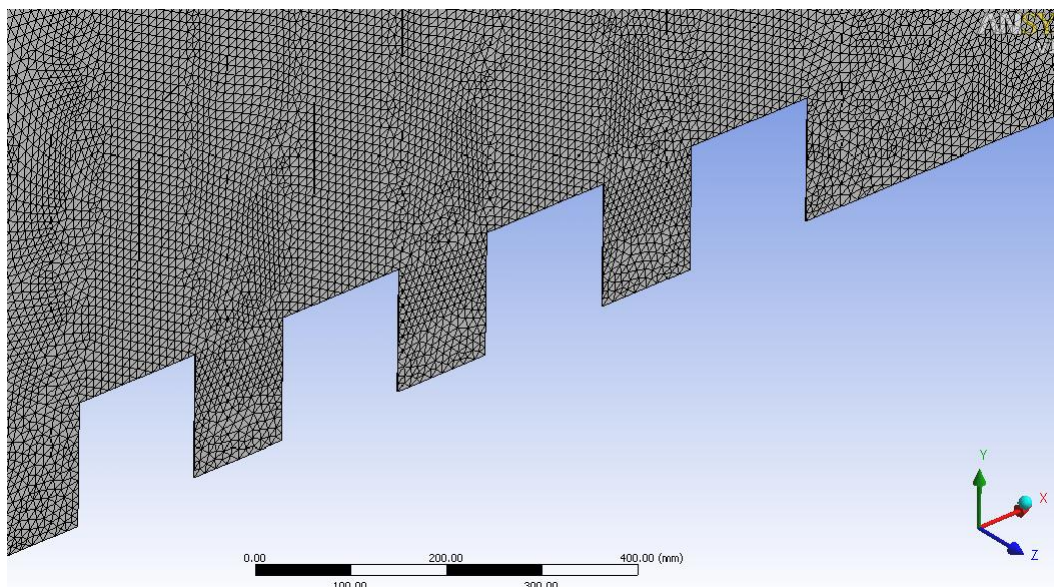


Figura 26 - Discretização do domínio bidimensional com malha não estruturada

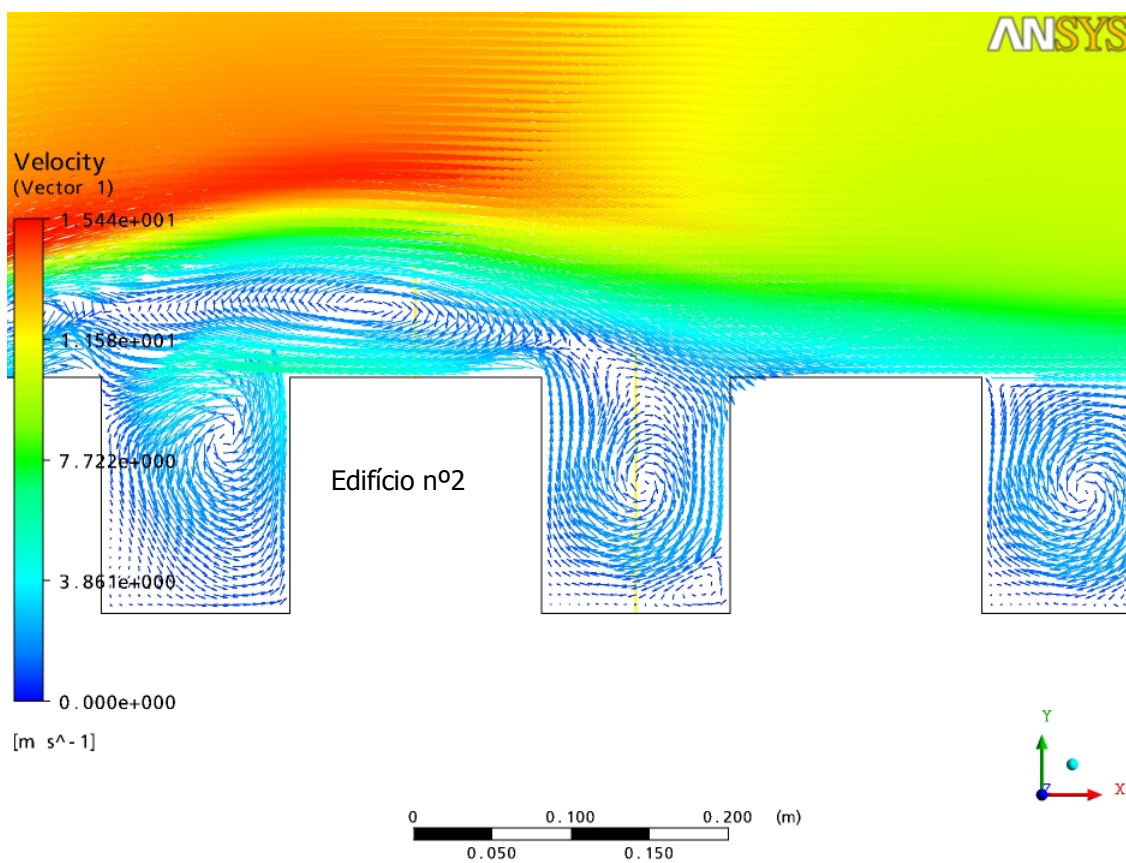


Figura 27 - Representação dos vectores de velocidade num ensaio bidimensional com malha estruturada

Na Figura 27, é visível o aparecimento de uma recirculação de ar em cada desfiladeiro urbano infinito que separa os edifícios. Nesta figura é visível a existência do regime de vento, *skimming flow* e a presença de apenas uma recirculação de ar entre os edifícios de *aspect ratio* ( $H/W$ ) igual a 1.25 tal como defendido por alguns autores. Esta informação pode ser obtida na revisão da literatura, tabelas 2 e 3.

Na Figura 28 é visível a melhor aproximação aos dados experimentais por parte da simulação numérica bidimensional cujo domínio de computação foi discriminado através de malha estruturada hexaédrica. Apesar de ter sido possível refinar muito mais a malha não estruturada, relativamente à estruturada, foram obtidos ainda assim melhores resultados com malha estruturada.

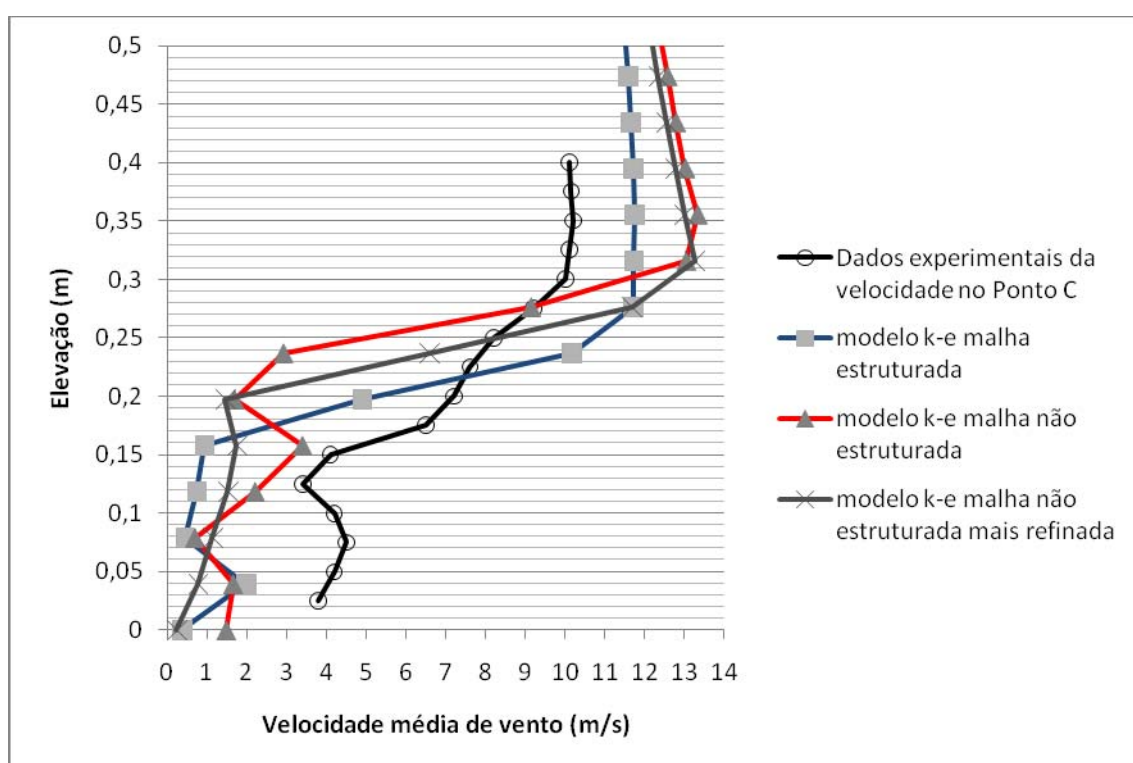


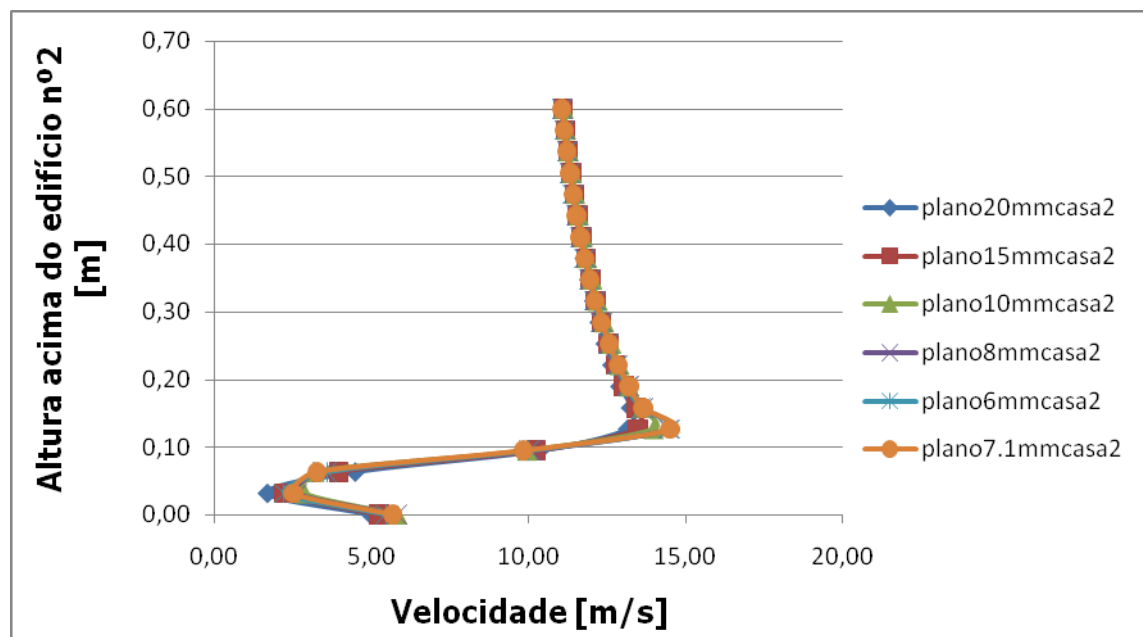
Figura 28 - Velocidade média no ponto C em função da altura ao solo, para o modelo k-e utilizando malha estruturada e não estruturada

Nas três simulações bidimensionais efectuadas foi aplicado o modelo de turbulência *standard k-ε*. Na primeira simulação efectuada foi utilizada malha hexaédrica estruturada com os elementos a terem um tamanho de malha de 6 milímetros. Na segunda simulação, para a mesma geometria, foi utilizada malha tetraédrica com elementos de igual tamanho de malha. Na terceira simulação, o domínio foi discretizado com malha tetraédrica em que as células foram mais refinadas e o tamanho de malha variava entre 3 e 6 milímetros. Os resultados extraídos da velocidade média no ponto C em função da altura ao solo para a primeira, segunda e terceira simulações bidimensionais foram comparados com os resultados experimentais em túnel de vento

e estão representados na figura 28. Os resultados da primeira, segunda e terceira simulações, correspondem às linhas a azul, vermelho e cinzento respectivamente. Ainda que os resultados das simulações numéricas bidimensionais não sejam representativas da velocidade média do escoamento nos desfiladeiros urbanos, o perfil de velocidades obtido tem um comportamento semelhante pelo que este tipo de simulações, ainda que mais qualitativas que quantitativas, serão utilizadas para a geração de dados de velocidade em cenários a descrever no capítulo referente às redes neuronais. Ainda assim é visível a melhor aproximação dos resultados obtidos através da simulação numérica em que o domínio foi discretizado através de malha estruturada.

### 3.5. Ensaio de dependência de malha

Como anteriormente referido, a independência de malha pode ser verificada através da simulação numérica do escoamento no domínio discretizado com malhas de tamanho diferente. Assim a independência de malha é conseguida quando os resultados das variáveis convergem e são iguais independentemente do tamanho da malha. Este método é consumidor de tempo, mas necessário. Assim, foi escolhido o modelo bidimensional à escala 1:1 igual ao da Figura 27. Os elementos seleccionados para a discretização do domínio foram células estruturadas. As condições de fronteira aplicadas ao domínio foram as supracitadas nos pontos anteriores.

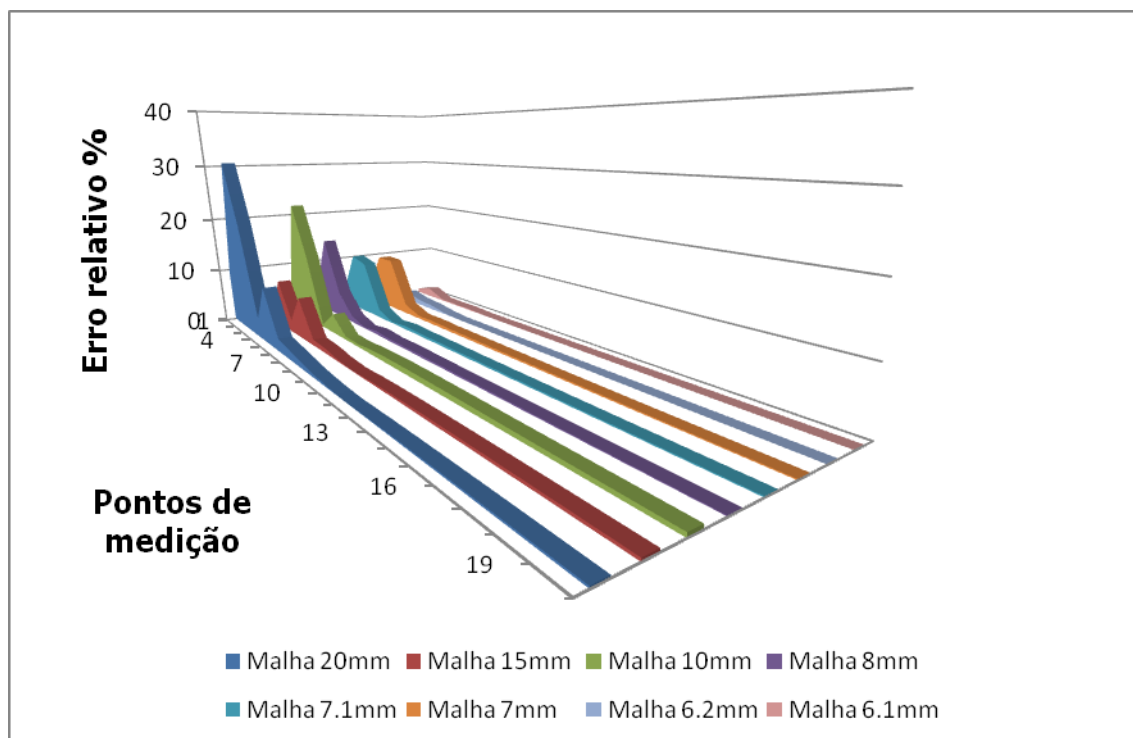


**Figura 29 - Valores da intensidade do vento acima do segundo edifício de teste para malha estruturada de diferentes tamanhos**

Na Figura 30, estão representados os valores de velocidade do ar a várias cotas acima do segundo edifício na direcção **XX**, Figura 27. Os pontos onde foram extraídos esses valores de velocidade, constituem uma linha com origem no topo do segundo edifício e que se propaga na direcção



normal a este, ou seja na direcção **OY**. Foram aplicados diferentes tamanhos de malha, para a mesma geometria de teste onde se mantiveram constantes as condições de fronteira aplicadas ao domínio.



**Figura 30 - Erro relativo da velocidade medida em simulações k-e, para diferentes tamanhos de malha estruturada relativamente à malha de dimensão mínima de 6 [mm]**

Na Figura 31, encontram-se os erros relativos dos valores da velocidade do vento medidos em vários pontos acima do segundo edifício de teste.

Estes erros relativos são calculados relativamente aos valores da velocidade do ar encontrados na simulação bidimensional com dimensão de elementos igual a 6 milímetros. Na Tabela 4, estão representados esses mesmos erros, em percentagem, calculados em vários pontos de medição acima do segundo edifício para diferentes tamanhos de malha. Assim o primeiro ponto de medição corresponde à cota  $Y = 0 \text{ cm}$ , sendo que o último ponto de medição, representado na Tabela 4, corresponde à cota  $Y = 31.58 \text{ cm}$ .

**Tabela 4 - Erro encontrado ao discretizar o mesmo domínio computacional com diferentes tamanhos de elementos**

Erro relativo (%) a dados de velocidade para malha de 6mm						
Y [cm]	20 [mm]	10 [mm]	8 [mm]	7 [mm]	6.5 [mm]	6.2 [mm]
0.00	9.3	6.3	5.9	3.6	1.8	0.8
3.16	30.7	22.3	14.7	10.2	4.6	1.7
6.32	19.8	13.0	5.0	10.2	0.9	1.0
9.47	3.6	0.4	1.3	1.8	1.5	0.8
12.63	10.1	3.6	0.2	0.6	0.4	0.2
15.79	2.3	0.6	0.7	0.7	0.0	0.0
18.95	1.7	0.5	0.4	0.5	0.0	0.0
22.11	1.1	0.8	0.4	0.5	0.0	0.0
25.26	0.5	1.0	0.4	0.4	0.0	0.0
28.42	0.2	1.0	0.4	0.4	0.0	0.0
31.58	0.0	1.0	0.3	0.3	0.0	0.0

#### **4. Geração de cenários para treino da rede neuronal**

Como referido na revisão bibliográfica a tendência em estudos deste tipo está a convergir para soluções que utilizem menos recursos físicos, energéticos ou computacionais. Foram referidos os trabalhos de Georgakis C. et al., [2007], e Lien et al., [2004] que recorrendo a métodos clássicos de medições experimentais no terreno e ensaios em túnel de vento tentaram desenvolver algoritmos com base em equações empíricas desenvolvidas no passado, tendo sempre como objectivo um menor recurso energético garantindo ainda assim elevada resolução nos valores devolvidos pelos métodos desenvolvidos. O objectivo deste trabalho é de caminhar no mesmo sentido. Nesta abordagem em particular, não se pretendem desenvolver novos algoritmos de cálculo mas aproveitar ferramentas já existentes que provaram ter resultados bastante satisfatórios quando o cenário em questão implicava a existência de resultados com grande variedade entre eles sendo complexa a sua integração numa equação que pudesse caracterizar completamente um determinado fenómeno. Este trabalho em particular depara-se com a grande variabilidade de resultados ao nível da intensidade de vento em cima dos edifícios que variam consoante muda a configuração do cenário, tornando extremamente complexo estabelecer uma correspondência directa entre as altitudes dos edifícios adjacentes com a intensidade de vento média em cima de um determinado edifício de teste. Neste sentido algum tipo de algoritmo capaz de codificar as relações entre as alturas variáveis dos edifícios a montante com a grande distribuição das velocidades médias de vento em cima do edifício de teste, e que ao mesmo tempo necessitasse de poucos recursos computacionais seria de extrema utilidade para o problema em questão.

Assim, surgiu a ideia de tentar implementar uma metodologia que conjugasse estas duas características mencionadas no parágrafo anterior. Face a estes pressupostos foi considerada a utilização de redes neuronais. Entre as suas principais virtudes estão os baixos requisitos de modelação quando comparadas com outros métodos já referidos. Esta redução deve-se ao facto de uma rede neuronal apenas necessitar de conjuntos de dados de *input-output* de modo a proceder à aprendizagem necessária ao reconhecimento padrão. Por outras palavras, no treino de uma rede neuronal não é necessário tomar em linha de conta todos os parâmetros que caracterizam um determinado escoamento quando este é perturbado facilitando a sua modelização.

##### **4.1. Redes neuronais**

A utilização de redes neuronais é um processo fortemente dependente da experiência do programador, dado que existem apenas regras empíricas um pouco vagas para a escolha dos parâmetros da rede como sejam o número de camadas ocultas e de neurónios presentes em cada uma, o número de épocas de treino, o número de conjuntos de treino e a própria subdivisão destes em conjuntos de treino, teste e validação. Assim o processo de treino da rede consiste fundamentalmente num ajuste de todos estes parâmetros na expectativa de se conseguir obter

uma correspondência tão fiel quanto possível entre um dado *input*, geralmente um vector definido pelo utilizador que contém as características mais importantes de um determinado cenário num conjunto de treino, e um output específico correspondente, normalmente um vector com o conjunto de dados alvo. Após a escolha dos vectores de treino e do ajuste dos parâmetros de rede, o processo de treino decorre até que seja atingido o critério de paragem definido pelo utilizador. A este tipo de metodologia dá-se o nome de treino supervisionado, sendo o tipo de treino mais usual neste tipo de aplicação.

A existência de um único elemento neuronal isolado, como seja um parâmetro de um cenário particular, não terá nenhuma capacidade interessante. Enquanto que vários relacionados entre si (*input-output*), combinados numa ou mais camadas ocultas podem conferir ao conjunto um poder computacional apreciável, [Demuth, H., Beale, M., 2000].

A arquitectura de uma rede consiste numa descrição do número de camadas ocultas, no número de neurónios em cada uma das camadas e da função de transferência presente nestas, sendo a escolha da arquitectura mais adequada a cada caso particular escolhida em função dos requisitos dos problema e da experiência do programador.

Dado que a computação efectuada pela rede neuronal consistir essencialmente num mapeamento dos valores de *input* para os de *output*, o número de neurónios responsável por estabelecer a correlação entre os dados de entrada e saída do sistema será um dos parâmetros a ser definido pelo utilizador, onde o grau de experiência do programador é essencial no sentido em que a uma boa definição dos parâmetros de rede é fundamental para um desempenho adequado. Normalmente quanto maior o número de neurónios presentes em cada uma das camadas ocultas, melhor será o desempenho da rede treinada, embora possam surgir problemas relacionados com o aumento da complexidade, ajuste e selecção dos parâmetros de rede e um aumento inevitável dos tempos de treino.

Um dos pressupostos do presente trabalho consiste na utilização de metodologias e algoritmos associados às redes neuronais mais simples dada a pouca experiência do utilizador. Assim serão utilizadas arquitecturas de rede com uma ou mais camadas ocultas, de tipo *feedforward*, sem retroacção entre camadas, utilizando algoritmos do tipo *backpropagation* e funções de activação típicas neste tipo de arquitecturas, *logsig* e *tansig*, Figura 32.

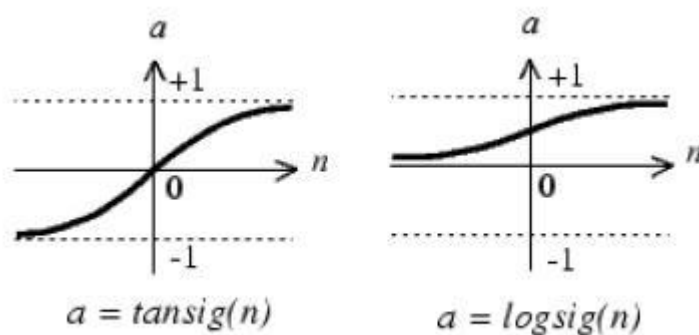


Figura 31 - Funções de activação *tansig* e *logsig*

Uma arquitectura *feedforward* com pelo menos uma camada oculta e funções de activação do tipo *logsig* e *tansig*, têm supostamente a capacidade de poder aproximar qualquer função contínua com um pequeno grau de aproximação, sendo muitas vezes referenciadas na literatura como aproximadores universais, [Demuth, H., Beale, M., 2000].

Neste tipo de treino de rede supervisionada, após o treino a rede gera uma função que para um dado vector de *input* devolve um vector de *output*. O utilizador supervisor apresenta no entanto à rede um vector de *output* ideal pelo que assim é possível determinar o erro realizado pela rede na aproximação efectuada. O caso óptimo seria o vector *output* devolvido pela rede ser idêntico ao vector *output* real, onde o erro cometido na aproximação seria diminuto. No entanto na maioria das vezes esta correspondência quase perfeita não acontece, dada a grande variabilidade dos valores alvo. Nessa situação, em que os valores *output* fornecidos para a aprendizagem da rede são diferentes dos devolvidos pela rede, vamos encontrar um erro que poderá ser minimizado fazendo variar os parâmetros de rede anteriormente referidos.

Um ciclo de treino é definido como sendo uma apresentação à rede de todos os cenários ou conjuntos de treino constituídos pelos vectores *input-output*. Estes dados fornecidos à rede estão inter-relacionados através das já mencionadas camadas ocultas. Estas camadas ocultas contêm os designados pesos que são continuamente ajustados de forma a tentarem estabelecer a melhor correspondência possível entre os dados *input-output*. Quando existe a necessidade de efectuar correcções nos pesos, esta pode ser feita de dois modos. O modo Padrão e o modo *Batch*. Em modo Padrão a correcção dos pesos acontece em cada iteração ou época, isto é, se a rede possui  $n$  conjuntos de pares *input-output* a cada iteração que faz, efectua também  $n$  correcções para os pesos. Em modo *Batch* apenas uma correcção é feita em cada ciclo de treino. Quando os conjuntos de treino são apresentados à rede, é calculado o seu erro médio e todas as correcções são efectuadas a partir deste valor. A caixa de ferramentas do *Matlab* implementa este modo de treino sob o nome de *train*, [Demuth, H., Beale, M., 2000].

O algoritmo *backpropagation* é o método mais utilizado para o treino de redes neuronais, sendo normalmente aplicado a redes de múltiplas camadas do tipo *feedforward*. Este algoritmo consiste essencialmente na actualização dos pesos da última camada de acordo com a regra *delta*, propagando o valor do erro para as camadas anteriores no sentido das saídas para as entradas, alterando os pesos de acordo com a sua influência em cada iteração no sentido de o diminuir progressivamente. Este algoritmo pode ser visto como uma generalização do método dos mínimos quadrados, onde técnicas de gradiente descendente são utilizadas de forma a minimizar o erro entre uma dada amostra e uma função que se tente aproximar desta. A actualização dos pesos efectua-se no sentido do decrescimento da função de desempenho, isto é, podendo uma iteração ser descrita de acordo com as equações 17 e 18.

$$\Delta x_i = -\eta_t \frac{\partial \text{Error}}{\partial x_i} \quad (17)$$

$$x_{i+1} = x_i - \eta_t g_i \quad (18)$$

Onde  $x_i$  é o vector dos pesos sinápticos actuais,  $g_i$  é o gradiente e  $\eta_t$  é a razão de aprendizagem. O treino pode ser visto como uma optimização baseada no valor dos gradientes, com eventuais problemas relacionados com a existência de mínimos locais. Por outras palavras imaginemos uma tentativa de interpolação de um conjunto de dados aleatórios no plano bidimensional. É frequente neste tipo de polinómios, existirem problemas de aproximação a mínimos locais ficando os mínimos absolutos fora da aproximação.

No algoritmo *backpropagation* estes problemas também acontecem. Existem no entanto metodologias geradas de forma a evitarem este tipo de ocorrências, que podem levar a fracas aprendizagens por parte da rede. Têm todavia a desvantagem de serem mais complexas e morosas relativamente ao método de gradiente descendente (*trainingd*). Uma das técnicas mais usadas é a designada por *Gradient Descent with momentum (trainingdm)*, que pode ser encontrada na caixa de ferramentas de redes neuronais do *Matlab*. Esta técnica tenta evitar mínimos locais com base na inércia da alteração dos pesos no sentido de caminhar para aproximações a mínimos absolutos. Esta técnica permite usar velocidades de aprendizagem mais elevadas sem o risco do algoritmo desprezar o mínimo absoluto, [Demuth, H., Beale, M., 2000].

Uma rede efectua o treino normalmente com um conjunto de treino, um de teste e um de validação. Normalmente a rede é treinada com um conjunto de pares *input-output* de treino, e a performance é medida com o conjunto de pares de validação. Este aspecto é relevante dado que uma rede que efectue um treino demasiado prolongado (*overtraining*) origina normalmente uma super especialização (*overfitting*). Este fenómeno pode acontecer normalmente em casos onde existam poucos pares de dados disponíveis para o treino, que por sua vez origina um decréscimo

de performance quando são apresentados os dados de teste. Assim ao serem apresentados novos conjuntos de teste podem surgir outputs com valores de erro elevados, que significam que a rede aprendeu com os exemplos de treino anteriores mas ainda não adquiriu capacidade de generalização para situações desconhecidas. A subdivisão dos conjuntos utilizados no treino é normalmente a partir do conjunto global de dados existentes, sendo que a 60% destes corresponderá o conjunto utilizado para treinar a rede, 30% corresponderá ao conjunto de validação e o restante ao conjunto de teste.

O conjunto de treino é utilizado no cálculo do gradiente de iteração para iteração e na actualização dos pesos. O conjunto de validação tem a função de servir para avaliar o erro durante o processo de treino, apresentando dados à rede que não constam do primeiro conjunto de forma a avaliar a capacidade de generalização da rede. A partir do momento em que uma rede entrar em *overfitting*, o erro de validação deverá aumentar. O conjunto de teste não é utilizado durante o treino, sendo que este serve apenas como termo de comparação na utilização de diferentes arquitecturas e algoritmos.

Para os diferentes tipos de rede e respectivas arquitecturas, as várias opções a testar em termos do número de camadas, número de neurónios em cada camada e algoritmo de treino escolhido serão avaliadas com base no melhor compromisso entre o mais baixo número de camadas e neurónios de forma a que se obtenha a melhor correspondência possível entre as variáveis de *input* e *output*.

Existem algumas regras empíricas no que toca à escolha de alguns parâmetros de rede, que em muitas das situações de treino podem ser úteis dada a inexperiência do utilizador e que servem muitas vezes de ponto de partida. Neste sentido temos as equações de *Kolmogorov* (para uma camada oculta) (19), a equação de *Rogers e Jenkins* (20) e a equação de *Kalogirou* (21).

$$N_h = 2J_i + 1 \quad (19)$$

$$N_c = 1 + \frac{N_h(J_i + J_o + 1)}{J_i} \quad (20)$$

$$N_h = \frac{1}{2}(J_i + J_o) + \sqrt{N_c} \quad (21)$$

Onde  $I_i$  é o número de elementos de *input*,  $I_o$  é o número de elementos de *output*,  $N_c$  é o número de neurónios para uma única camada oculta e  $N_t$  é o número total de conjuntos de treino.

Estas expressões podem servir como ponto de partida no cálculo aproximado do número de neurónios em uma ou mais camadas ocultas, [Calisto, H. M. F., 2006].

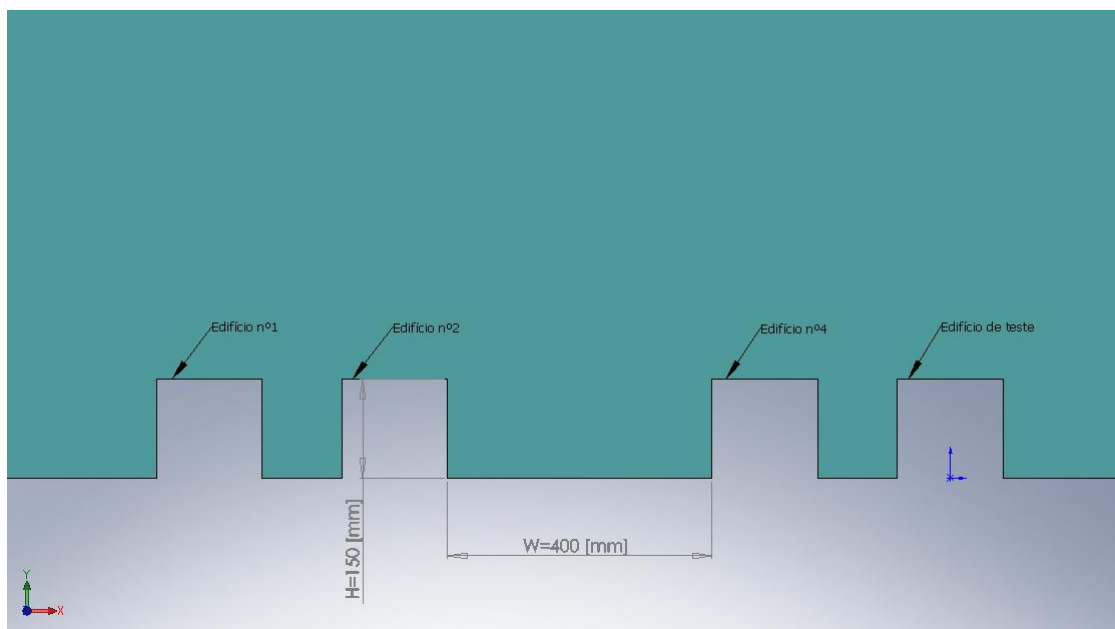
Após o processamento dos dados a sua divisão em conjuntos e definidas as opções à arquitectura de rede a usar e parâmetros de rede a ajustar resta definir qual o algoritmo de treino que conduza ao melhor desempenho possível. A caixa de ferramentas de redes neuronais do *Matlab* permite implementar o algoritmo *backpropagation*, vários modos de treino como *Batch* e *Gradient Descent with momentum* e ainda algoritmos frequentemente usados como o algoritmo de *Levenberg-Marquardt (trainlm)*, o algoritmo *Resilient Backpropagation (trainrp)* e o algoritmo *Adaptative Learning Rate (traingdx)*. Estes algoritmos são alguns dos mais frequentemente utilizados no treino de redes neuronais, [Demuth, H., Beale, M., 2000].

#### **4.2. Treino de redes Neuronais utilizando valores de velocidade calculados por simulação numérica bidimensional**

As redes neuronais são baseadas num registo do histórico de dados obtido a partir de simulações bidimensionais que têm como objectivo a determinação da velocidade média do vento a várias altitudes acima do edifício de teste. Estes dados são definidos como os dados de *output* da rede. Os dados de *input* escolhidos foram as altitudes dos edifícios adjacentes a montante do edifício de teste. Foi assim desenvolvida uma base de dados, a partir de vários cenários simulados em **CFX**. Foram escolhidos cinco edifícios sendo o último o de teste. Nos primeiros três edifícios a sua altura podia variar entre 0,5,10 e 15 cm de forma a se poder aumentar a variabilidade dos regimes de vento que se desenvolvem entre eles e aumentar também a variabilidade dos valores recolhidos de velocidade acima do edifício de teste. Assim o número de cenários possíveis é de 192 dado que foi forçado a que no quarto e penúltimo edifício a sua altura apenas variasse entre 5,10 e 15 cm de forma a ser evitada maior complexidade no escoamento e maior número de cenários possíveis. O quinto edifício a jusante dos já mencionados será o edifício de teste. A sua altura é fixa em todos os cenários e igual a 15 cm. Os valores de *output* usados no treino da rede neuronal são obtidos a partir de simulações numéricas bidimensionais em vários pontos acima deste edifício. A geração de dados foi assim processada e desenvolvida de forma a ser utilizada no treino de uma rede neuronal na expectativa de que esta pudesse efectuar a aprendizagem e adquirisse capacidade de generalização. Feito o treino da rede espera-se que esta possa devolver os valores de velocidade respectivos aos cenários simulados e mesmo não simulados.

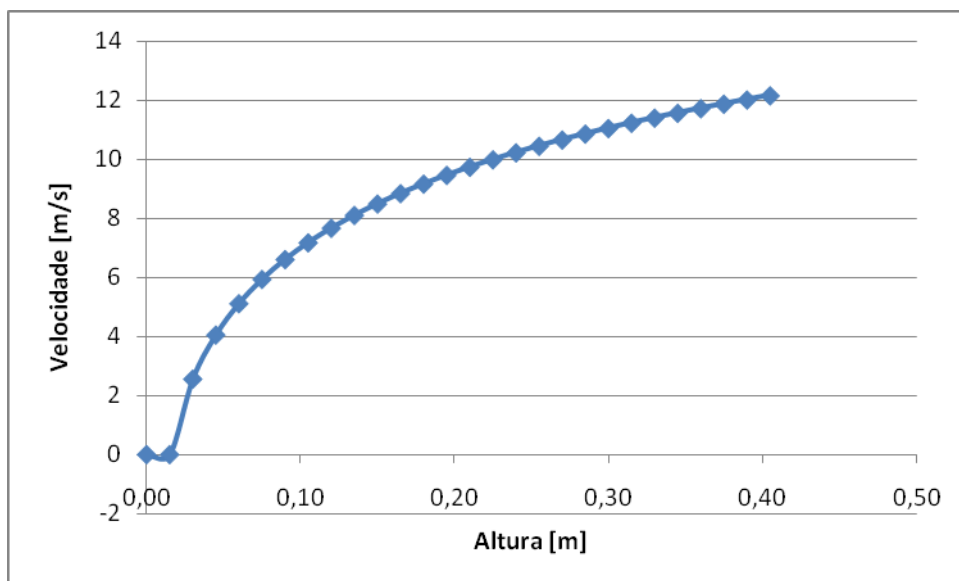


Na Figura 33, está representado o cenário 37 utilizado no treino da rede neuronal artificial. Nesta figura o desfiladeiro mais comprido tem um *aspect ratio* de 0.375, e são visíveis os edifícios 1,2,4 e de teste.



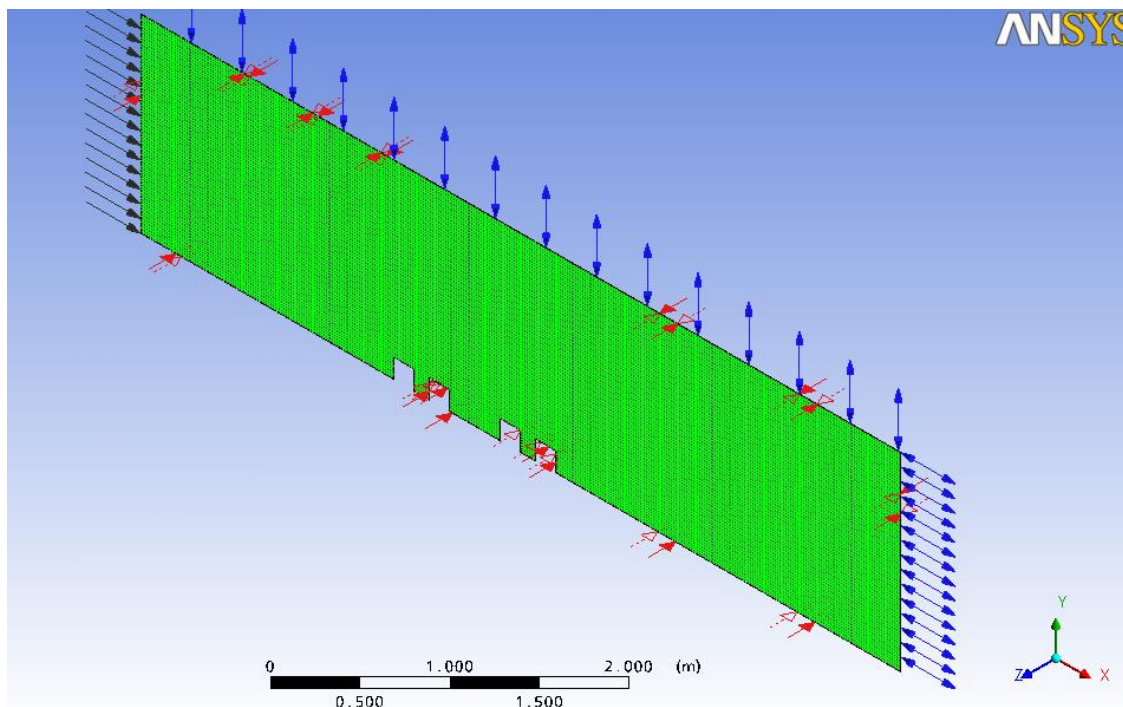
**Figura 32 - Modelação geométrica do cenário 37, onde está representada uma zona com *aspect ratio* compreendido entre 0.3 e 0.7**

No sentido de introduzir um perfil de velocidades representativo de uma zona urbana foi utilizada a Equação 2, presente no capítulo referente ao Estado da arte. Na Figura 34, está representado o perfil de velocidades, referente a uma zona urbana, onde foi escolhida uma velocidade de referência igual a  $7 \frac{\text{m}}{\text{s}}$  hipoteticamente medidos para uma altura à escala de  $10 \text{ cm}$ . Numa situação real, por exemplo, à escala de 100:1 este valor de velocidade de referência corresponderia a uma altura ao solo de  $10 \text{ m}$ . Esta foi a velocidade de referência escolhida para a simulação de todos os cenários simulados em CFX. A altura rugosa foi definida com sendo igual a  $1.5 \text{ cm}$ . Este perfil de velocidades, representado na Figura 34, foi definido como condição de fronteira de velocidade imposta na simulação numérica de todos os cenários utilizados para treinar a rede neuronal. À entrada foi definida uma intensidade turbulenta de  $5\%$ , que corresponde a um valor nominal de 0.05. Este valor é recomendado pelo *software* na ausência de dados adicionais.



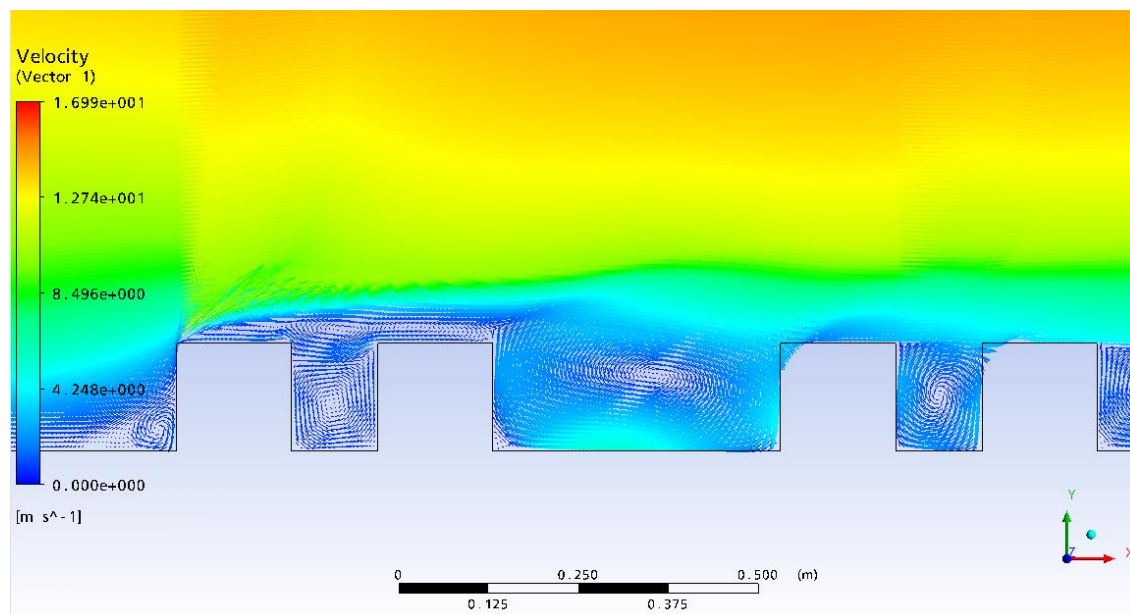
**Figura 33 - Velocidade do ar imposta como condição de fronteira à entrada do domínio computacional**

Na Figura 35, são visíveis as condições de fronteira aplicadas ao domínio computacional representativo do cenário de treino 37. Mantiveram-se constantes todas as outras condições de fronteira já referidas e aplicadas aos diversos domínios.



**Figura 34 - Condições de fronteira aplicadas à geometria correspondente ao cenário 37**

Na Figura 36, é visível o campo de velocidades que se desenvolve sobre a geometria urbana. Não é no entanto completamente visível o regime de vento **WIF**, a montante do edifício de teste, que seria expectável de acordo com o valor de *aspect ratio* para este desfiladeiro urbano.



**Figura 35 - Campo de velocidades referente ao cenário 37**

Na Figura 37, está representada a modelação geométrica do cenário 4, onde entre os edifícios 1 e 4 se encontra uma zona, correspondente ao desfiladeiro urbano, com um *aspect ratio* igual a 0.22.

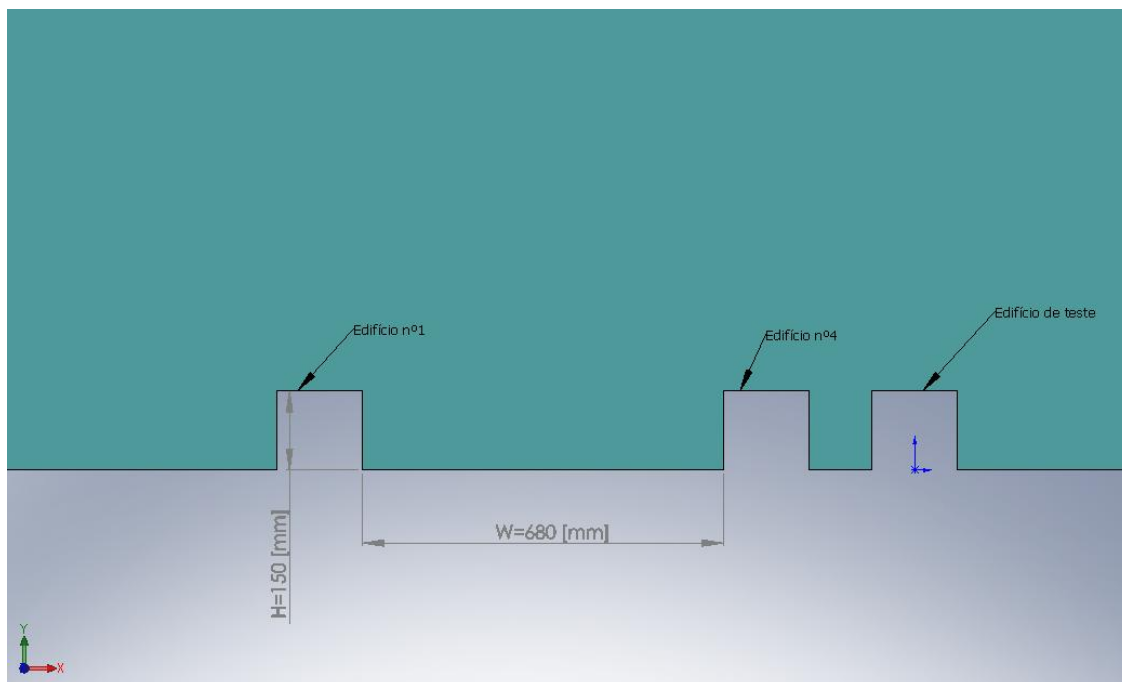


Figura 36 - Modelação geométrica do cenário 4, onde está representada uma zona com *aspect ratio* igual menor que 0.3

Na Figura 38 está representado o campo de velocidades calculado por simulação numérica em CFX. Na zona correspondente ao desfiladeiro urbano com *aspect ratio* igual a 0.22, é evidenciado o regime de vento **IRF** a montante do edifício de teste.

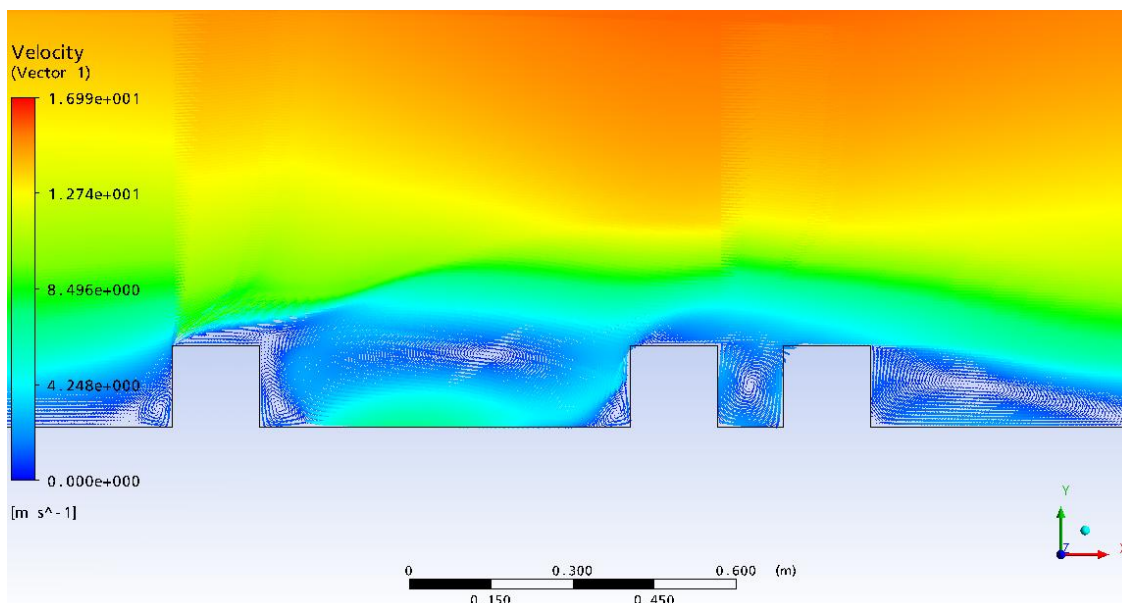


Figura 37 - Campo de velocidades referente ao cenário 4

### 4.3. Descrição do modelo Neuronal

Para o treino da rede neuronal, os valores de *input* escolhidos para apresentar a rede são as alturas dos quatro edifícios a montante do edifício de teste. Na Figura 39 é exemplificada a construção da matriz correspondente aos dados de *input*. As primeiras quatro linhas de cada coluna correspondem aos vectores de *input* apresentados à rede.



Edifício	Cenários			
	1	2	...	89
1	5	0	...	10
2	15	15	...	10
3	0	5	...	10
4	15	5	...	15
5	15	15	15	15

Figura 38 - Matriz de vectores de dados de *input* utilizados no treino da rede neuronal artificial

Na Figura 40, é visível o vector de *output* apresentado à rede para o treino. Neste estão presentes as velocidades consideradas reais obtidas por simulação em CFD. Nesta figura estão representadas as velocidades medidas 2 cm acima do edifício de teste.



5º Edifício	Altura [m]	Cenários			
		1	2	...	89
	0,17	5,74	4,72	...	4,77

Velocidade real [m/s]

Figura 39 - Vector de dados de *output* utilizado no treino da rede neuronal artificial

Após o treino da rede, espera-se que esta adquira capacidade de generalização, isto é, que devolva uma função capaz de fazer corresponder uma determinada velocidade acima do edifício de teste mediante o cenário que lhe é apresentado.

As alturas escolhidas, para medição de dados de velocidade, acima do edifício de teste foram de 2,3 e 5 cm. Na Figura 41 está representada a matriz constituída pelo conjunto de cenários seleccionados para a simulação das velocidades, acima do edifício de teste, através da função gerada pela rede neuronal artificial. Os dez primeiros cenários correspondem a cenários já utilizados durante o treino da rede, ou seja, para a geração da função de treino. Os últimos dez cenários correspondem a cenários que a rede nunca conheceu e que serão usados para avaliar a função de treino obtida através da rede neuronal.

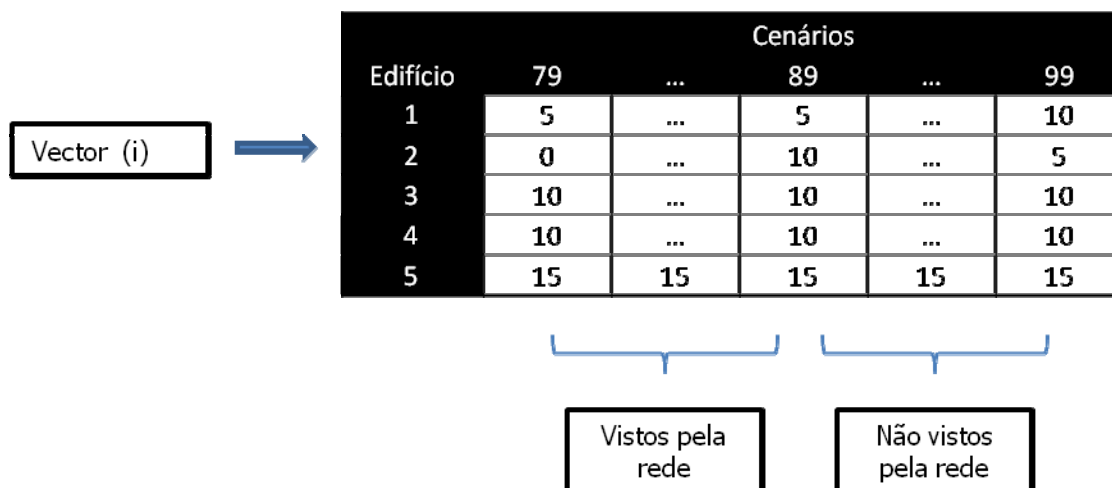


Figura 40 - Matriz de vectores de dados referentes a dez cenários já vistos pela rede e a dez cenários não vistos pela rede

Estes vinte cenários são introduzidos como *input* na função gerada pela rede. Para futura comparação com velocidades simuladas pela rede neuronal, existe sempre um vector de controlo com as velocidades obtidas por simulação em CFD, visível na Figura 42.



Figura 41 - Vector de dados de velocidade do vento medidos 2 cm acima do edifício de teste nos cenários compreendidos entre 79-99

A função neuronal devolve um valor de velocidade simulada para cada cenário, como pode ser observado na Figura 43.



Figura 42 - Vector de dados de velocidade do vento simulados pela rede neuronal 2 cm acima do edifício de teste nos cenários compreendidos entre 79-99

A função gerada após o treino da rede neuronal poderá ter o aspecto da Figura 44. O que poderá variar eventualmente será o número de neurónios presentes na camada oculta.

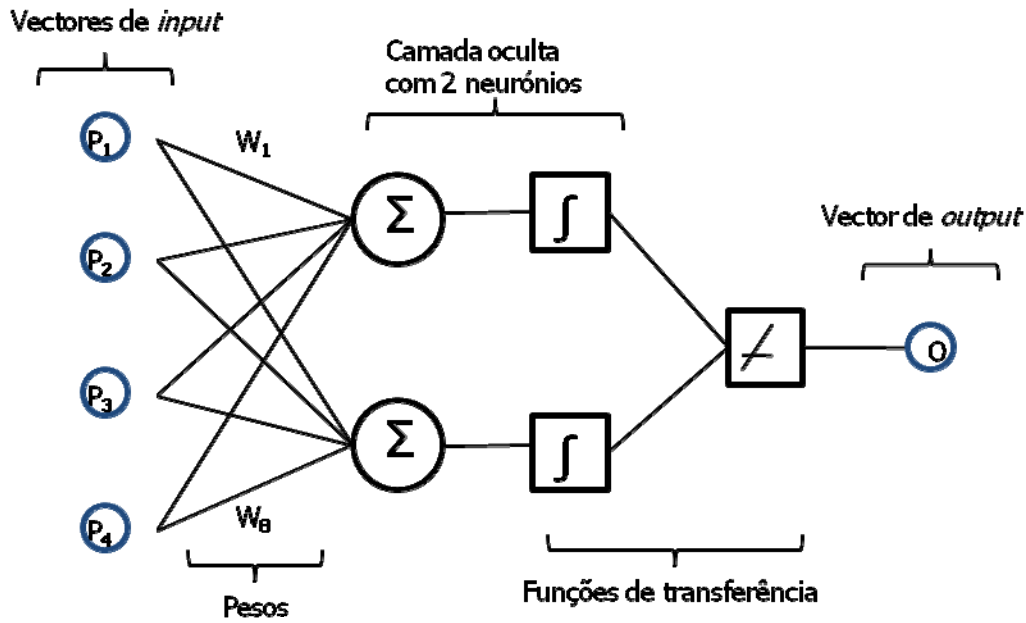


Figura 43 - Arquitectura de rede neuronal artificial com 1 camada oculta e dois neurónios escondidos, evidenciando os vectores de *input*, *output*, pesos das ligações e funções de transferência

O critério de paragem numa rede neuronal é arbitrário pelo que poderá ser definido pelo utilizador. Neste caso em particular o critério de paragem no que toca ao treino da rede, e escolha dos parâmetros que possibilitassem a geração da função neuronal que melhor se aproximasse dos dados reais, foi definido de acordo com o seguinte modelo de equações.

$$V_{ref} = [0] \quad (22)$$

Na Equação 22, a velocidade considerada como referência corresponde ao vector composto pelas velocidades consideradas reais e obtidas por simulação em CFD.

$$V_{sim} = [0] \quad (23)$$

Na Equação 23,  $V_{sim}$  corresponde ao vector composto pelo valor das velocidades simuladas pela rede neuronal.

$$Erro_{relativo} = \frac{V_{sim} - V_{ref}}{V_{ref}} \quad (24)$$

O erro associado às velocidades simuladas pela rede é calculado com base na Equação 24.

$$Erro_{conhecidas_i} = [Erro_{relativo}, \text{colunas } 79 - 89] \quad (25)$$

O erro associado às velocidades simuladas e já conhecidas pela rede é calculado de acordo com a Equação 25.

$$\overline{\text{Erro}_{desconhecidos}} = [\text{Erro}_{relativo, \text{colunas } 89 \text{ a } 99}] \quad (26)$$

O erro associado às velocidades simuladas não conhecidas pela rede é calculado de acordo com a Equação 26.

$$\overline{\text{Erro}_{conhecidos}} = \frac{1}{25} \sum_{i=1}^{25} \text{Erro}_{relativo_i} \quad (27)$$

No algoritmo de treino desenvolvido e para cada número de iterações escolhido, para cada cenário apresentado à rede são efectuados 25 treinos. Desses 25 treinos é calculada uma velocidade média representativa de cada cenário e é calculado um erro médio relativamente ao valor da velocidade real desse mesmo cenário. Para os primeiros dez cenários apresentados à rede esse erro é calculado de acordo com a Equação 27.

$$\overline{\text{Erro}_{desconhecidos}} = \frac{1}{25} \sum_{i=1}^{25} \text{Erro}_{relativo_i} \quad (28)$$

Para os últimos dez cenários apresentados à rede esse erro é calculado de acordo com a Equação 28.

Aos erros médios obtidos para os cenários simulados está associado um intervalo de confiança que pode ser obtido de acordo com a Figura 45, [url<sub>6</sub>]. Para um intervalo de confiança de 95 % o erro, máximo e mínimo, relativamente ao conjunto de cenários desconhecidos será de  $\overline{\text{Erro}_{desconhecidos}} \pm 2\sigma_{desconhecidos}$  e relativamente ao conjunto de cenários já vistos pela rede será de  $\overline{\text{Erro}_{conhecidos}} \pm 2\sigma_{conhecidos}$ . O desvio padrão da velocidade simulada relativamente aos 25 treinos efectuados pela rede para os cenários conhecidos e desconhecidos pode ser dado pelas Equações 29 e 30.



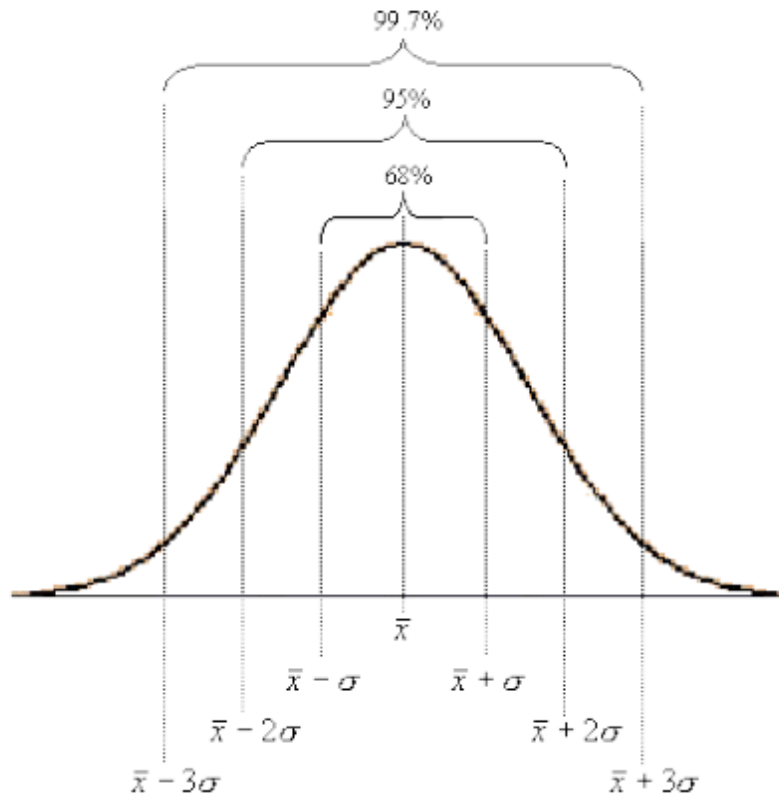


Figura 44 - Intervalo de confiança de uma determinada grandeza em função do desvio padrão

$$\sigma_{conhecidos} = \sqrt{\frac{1}{25} \sum_{i=1}^{25} (\text{Erro}_{conhecidos_i} - \overline{\text{Erro}_{conhecidos}})^2} \quad (29)$$

$$\sigma_{desconhecidos} = \sqrt{\frac{1}{25} \sum_{i=1}^{25} (\text{Erro}_{desconhecidos_i} - \overline{\text{Erro}_{desconhecidos}})^2} \quad (30)$$

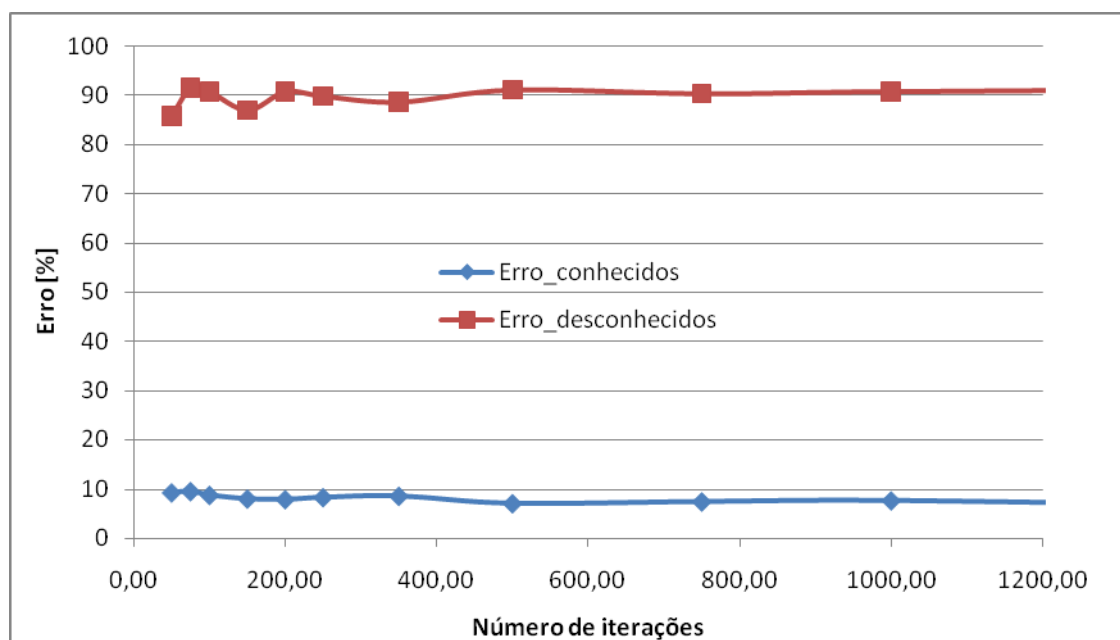
#### 4.4. Apresentação dos casos de teste

De acordo com a metodologia supracitada, foi efectuada a simulação de velocidades acima do edifício de teste em vários pontos. Usualmente a compreensão de um fenómeno complexo parte da compreensão de fenómenos mais simples. O mesmo se pretende demonstrar nesta tese. Assim o algoritmo de treino utilizado no sentido de se perceber se a abordagem para a previsão de ventos locais em ambiente urbano pode passar por redes neuronais artificiais deve numa primeira instância passar pela utilização de algoritmos de treino mais simples. O algoritmo de treino

utilizado na arquitectura de rede foi o *traingd*. De acordo com a metodologia de treino e de acordo com os parâmetros de *input* da rede, foram treinados 99 cenários de 192 possíveis.

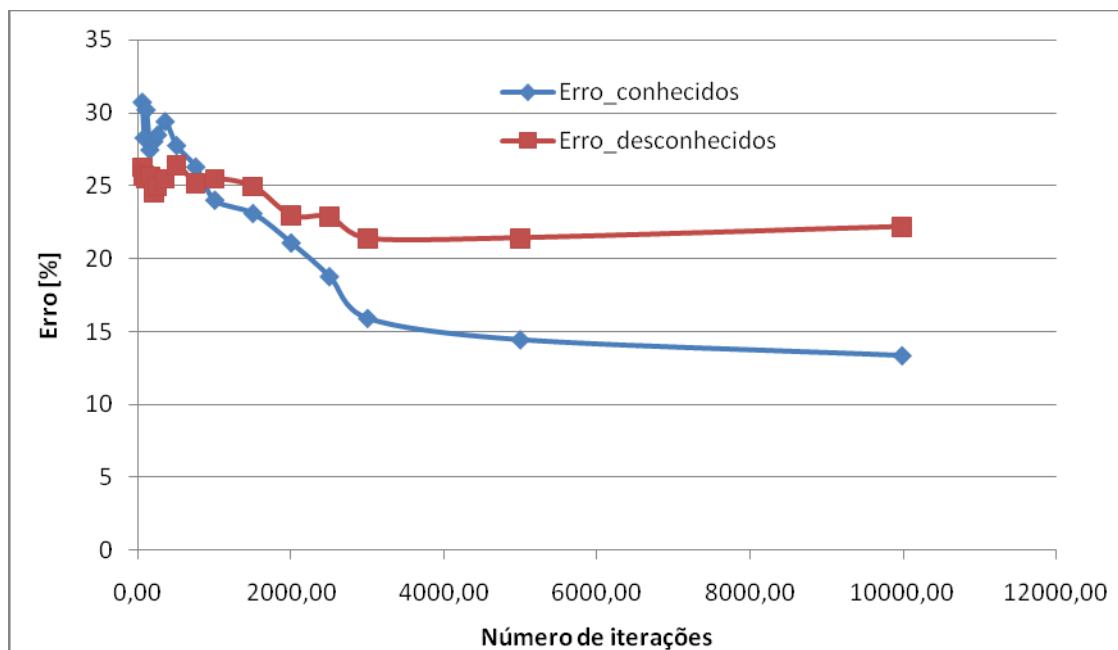
Para os 20 cenários supracitados, reservados para comparação, são simulados os valores das velocidades através da rede neuronal. O erro das velocidades simuladas é calculado relativamente às velocidades consideradas reais obtidas através de simulação em **CFX**.

Na Figura 46, está representado o valor de erro encontrado em função do número de iterações escolhido para cada ciclo de treino. As velocidades do vento foram simuladas para uma altura de 17 cm ao solo, ou seja, 2 cm acima do edifício de teste. A figura 46, corresponde ao caso em que são utilizados, para o treino da rede, dados de velocidades reais e simuladas de 49 cenários dos 99 existentes.



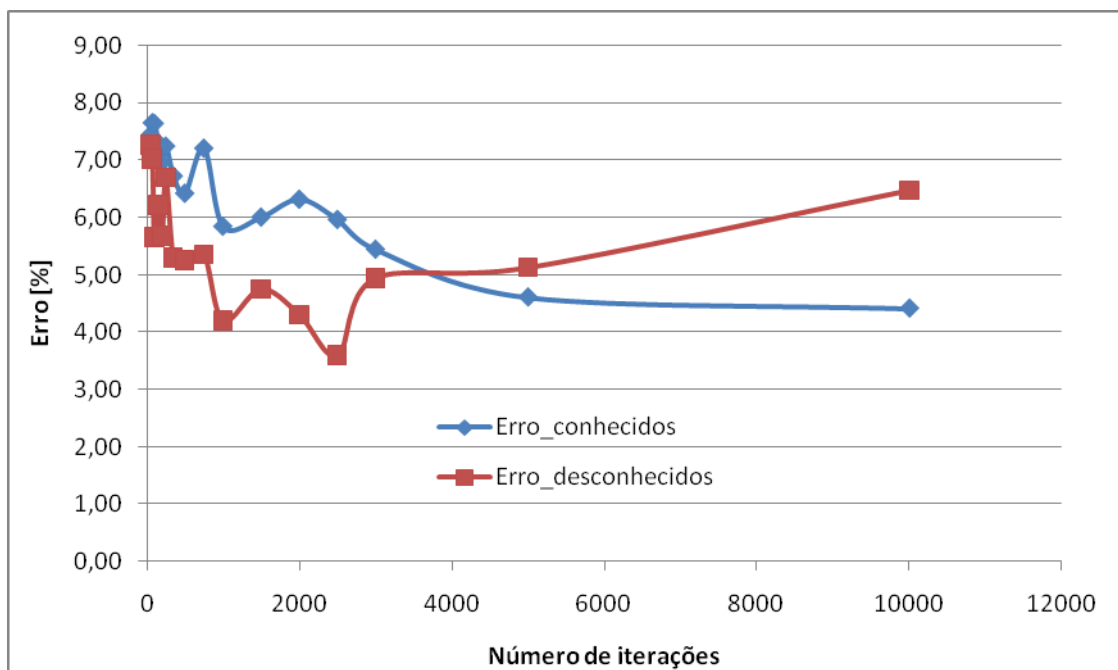
**Figura 45 - Erro associado aos valores de velocidades simuladas, 2 cm acima do edifício de teste, para o algoritmo *traingd*, utilizando 49 cenários para o treino e 5 neurónios na camada oculta**

Na Figura 47, estão representados os erros encontrados para as velocidades simuladas 2cm acima do edifício de teste utilizando 69 cenários para o treino da rede neuronal.



**Figura 46 - Erro associado aos valores de velocidades simuladas, 2 cm acima do edifício de teste, para o algoritmo *traingd*, utilizando 69 cenários para o treino e 5 neurónios na camada oculta**

Na Figura 48, estão representados os erros encontrados para as velocidades simuladas 2cm acima do edifício de teste utilizando 89 cenários para o treino da rede neuronal. Nas três figuras supracitadas o número de neurónios escolhido para a camada oculta foi de 5 neurónios. Durante o treino dos vários casos de teste, fez-se variar o número de neurónios na camada oculta entre 4 e 10 neurónios. Os melhores resultados no que toca à simulação de velocidades para várias alturas acima do edifício de teste foram encontrados para um número de neurónios na camada oculta igual a 5.



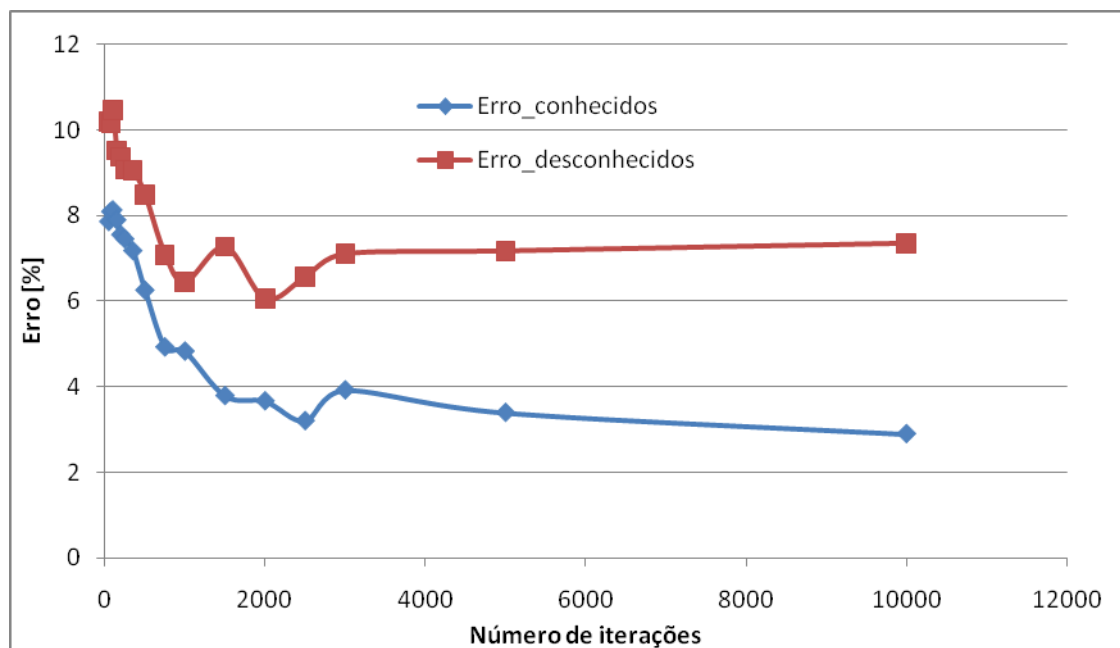
**Figura 47 - Erro associado aos valores de velocidades simuladas, 2 cm acima do edifício de teste, para o algoritmo *trainingd*, utilizando 89 cenários para o treino e 5 neurónios na camada oculta**

Na Tabela 5, podem ser encontrados dados referentes ao gráfico da Figura 48. Entre estes estão o erro médio encontrado para as velocidades simuladas e já conhecidos pela rede neuronal, o erro médio encontrado para as velocidades simuladas desconhecidas, isto é, que não foram utilizadas durante o processo de treino da rede, o desvio padrão do erro relativo aos dados já conhecidos e o desvio padrão do erro relativo ao conjunto de dados desconhecidos. As linhas da Tabela 5, correspondem a diferentes ciclos de treino. Em todos os conjuntos de treino, foram seleccionados 20 cenários para o controlo do desempenho da rede. Dez desses cenários, independentemente do conjunto de treino, foram utilizados tanto para o treino da rede como para o controle do desempenho da mesma. Os restantes 10 cenários, não utilizados no treino, foram posteriormente simulados pela função gerada pela rede, e utilizados também para o controle do desempenho da mesma.

**Tabela 5 - Valores de erro médio e desvio padrão para os valores da velocidade simulada relativamente aos cenários conhecidos e desconhecidos da rede neuronal artificial**

Iterações	$\frac{\sum  v_{sim} - v_{con} }{N}$	$\frac{\sum  v_{sim} - v_{des} }{N}$	$\frac{\sum  v_{sim} - v_{con} }{N}$	$\frac{\sum  v_{sim} - v_{des} }{N}$
50	7.44	7.27	3.78	4.55
75	7.65	7.02	3.72	5.18
100	7.64	5.65	3.52	3.83
150	7.30	6.22	3.35	4.58
200	6.95	5.67	3.45	4.40
250	7.24	6.69	3.97	4.99
350	6.72	5.29	2.95	4.07
500	6.42	5.24	3.34	4.08
750	7.21	5.35	3.11	3.09
1000	5.84	4.19	3.62	2.84
1500	6.00	4.74	3.92	3.31
2000	6.31	4.30	3.71	2.81
2500	5.96	3.58	4.25	2.69
3000	5.44	4.94	4.72	3.16
5000	4.61	5.12	4.67	3.49
10000	4.41	6.47	4.91	4.22

Na Figura 49, estão representados os erros encontrados para as velocidades simuladas 5 cm acima do edifício de teste utilizando 89 cenários para o treino da rede neuronal.



**Figura 48 - Erro associado aos valores de velocidades simuladas, 5 cm acima do edifício de teste, para o algoritmo traingd, utilizando 89 cenários para o treino e 5 neurónios na camada oculta**

Na figura anterior, as duas linhas de erro não se chegam a cruzar, no entanto é obtido um erro relativo máximo na ordem dos 6 % para um ciclo de treino com o número de iterações escolhido igual a 2000.

## 5. Conclusões e propostas de trabalho futuro

Fazer engenharia passa, não só por procurar e saber manusear ferramentas que possibilitem a resolução de problemas que se nos colocam, mas também por contribuir para uma compreensão superior dos mesmos. O trabalho desenvolvido ao longo da presente tese foi direccionado nesse sentido. Foi feita a tentativa de explorar uma nova metodologia que ajudasse à compreensão da previsão de ventos locais em ambiente urbano, nunca descurando o rigor científico e a precisão dos resultados, tendo sempre como objectivo a redução do custo, de uma forma generalizada. Este pode ser ao nível financeiro, do consumo de tempo e energético. Nos próximos parágrafos serão descritas as principais conclusões do trabalho desenvolvido.

### 5.1. Conclusões

Comprovou-se numericamente a existência do regime de vento **SF** para a zona compreendida entre a *canopy layer* (**CL**) e a subcamada rugosa (**SCR**), para um *aspect ratio* igual a 1.25 (subcapítulo 3.4.1). Para alturas, em **yy**, compreendidas entre os 0 metros e os 0.15 metros (altura dos blocos de madeira), para dados de velocidade calculados, no centro do desfiladeiro urbano, em vários pontos, verifica-se que os dados obtidos por simulação numérica são subestimados relativamente aos dados obtidos para a velocidade do vento em túnel de vento. Acima da altura de 0.15 metros, as velocidades calculadas quase que coincidem com as velocidades obtidas em túnel de vento, pelo que se poderá afirmar que as velocidades calculadas por simulação numérica tridimensional correspondem às velocidades simuladas em túnel de vento, na zona correspondente à subcamada rugosa.

Verificou-se a existência do regime de vento **SF** para a zona compreendida entre a *canopy layer* (**CL**) e a subcamada rugosa (**SCR**), para um *aspect ratio* igual a 1.25 (subcapítulo 3.4.2.). Verificou-se ainda que apesar de ter sido possível efectuar um maior refinamento na malha não estruturada, foi com malha estruturada que se obtiveram resultados mais próximos dos simulados em túnel de vento. Esta diferença para os resultados da velocidade do ar, calculados na zona crítica (desfiladeiro urbano infinito), deverá estar relacionada com um fenómeno particular relacionado com a utilização de alguns tipos de elementos na discretização do domínio computacional. Além da viscosidade característica do próprio fluido e da viscosidade turbulenta gerada, quando o escoamento atravessa obstáculos, existe ainda muito provavelmente a adição deste fenómeno, reportado por vários autores e mencionado neste subcapítulo com a designação de viscosidade numérica ou difusão numérica, [Sander Mertens, 2006].

Ainda que os resultados das simulações numéricas bidimensionais não sejam representativos da velocidade média do escoamento, nos desfiladeiros urbanos e acima dos topos dos edifícios, foi obtido um perfil de velocidades com um comportamento semelhante, pelo que este tipo de

simulações, ainda que qualitativas, foram utilizadas para a geração de dados de velocidade em cenários diferentes.

Não se verificou o regime de vento **WIF**, expectável no cenário 37, para um *aspect ratio* igual a 0.375 (subcapítulo 4.2.). Para este *aspect ratio*, a perturbação, causada pela recirculação gerada pelo edifício imediatamente a jusante, aparentemente não interfere na esteira gerada pela resistência ao escoamento do edifício a montante. Esta perturbação não é evidente, provavelmente dada a proximidade do valor obtido para o *aspect ratio* estar muito próximo do limite inferior verificado para este regime de vento, [Oke, 1988].

Verificou-se a existência do regime de vento **IRF**, expectável no cenário 4, para um *aspect ratio* igual a 0.22 (subcapítulo 4.2.). As perturbações locais no escoamento, provocadas pelos edifícios, não interagem, o que significa que o escoamento encontra o quarto edifício, sem ser perturbado pela existência do primeiro edifício a montante. Assim e ainda que de forma qualitativa, os cenários gerados para o treino de redes neuronais apresentam regimes de vento que de uma forma global estão de acordo com os resultados, encontrados por vários autores, mencionados no capítulo referente ao estado da arte.

Verificou-se a viabilidade da utilização do algoritmo *traingd*, para o treino da rede neuronal artificial (subcapítulo 4.4.). Onde os valores obtidos para as velocidades simuladas, pela rede, acima do edifício de teste convergiram para valores muito próximos dos valores simulados por simulação numérica em **CFD**, à medida que se foram introduzindo cada vez mais cenários para o treino da rede. Os melhores resultados, no que toca à simulação de velocidades para várias alturas acima do edifício de teste, foram encontrados para um número de neurónios na camada oculta igual a 5.

Nos resultados obtidos referentes à utilização de um conjunto de treino composto por 49 cenários, foi verificado um erro de aproximadamente 90% para os 10 cenários, desconhecidos da rede e que constituem o conjunto de teste, pelo que a rede não funciona bem para esse conjunto de treino, por não gerar uma função de cálculo com capacidade de generalização em simulações de cenários aleatórios desconhecidos.

Nos resultados obtidos, referentes à utilização de um conjunto de treino composto por 69 cenários, foi verificado um erro de aproximadamente 25% para a situação considerada ideal. Esta situação ocorre quando o erro associado às velocidades simuladas, acima do edifício de teste, para os primeiros dez cenários do conjunto de teste, já conhecidos pela rede, é aproximadamente igual ao erro associado às velocidades simuladas para os restantes dez cenários, também pertencentes ao conjunto de teste, mas nunca vistos pela rede. Neste caso, a função gerada pela rede adquiriu uma melhor capacidade de generalização.



A capacidade de generalização da rede aumentou quando esta foi treinada com 89 cenários dos 99 disponíveis, onde foi verificado um erro de aproximadamente 5% para a situação considerada ideal.

Outro aspecto verificado, e já reportado neste subcapítulo, foram os fenómenos de *overtraining* e *overfitting*. Estes fenómenos foram verificados à medida que se prolongava o treino da rede.

A rede obrigou a que a função gerada durante o treino, para a simulação da velocidade, devolvesse valores simulados cada vez mais próximos dos já conhecidos. Quando a função gerada pela rede começou a entrar em *overtraining*, ao serem apresentados novos conjuntos de teste, desconhecidos pela rede, surgiram *outputs* com valores de erro cada vez mais elevados. Nesta situação verificou-se que a rede começava a perder capacidade de generalização a partir de um determinado número de iterações. Os erros encontrados e supracitados, referem-se a dados de velocidade simulados para uma altura de 2 cm. Relativamente a outras alturas, o comportamento é semelhante, como se verificou na Figura 49, onde o erro associado aos valores das velocidades simuladas, 5 cm acima do edifício de teste, foi de aproximadamente 6%, na situação considerada ideal.

## **5.2. Trabalho Futuro**

De acordo com os resultados obtidos, a metodologia adoptada relativamente à utilização de redes neuronais artificiais, na previsão de ventos em ambiente urbano, revelou resultados promissores. Uma abordagem mais intensiva é recomendada, no sentido do eventual desenvolvimento de uma ferramenta que permita, de uma forma expedita e sem grandes conhecimentos, por parte do utilizador, conseguir efectuar a previsão de ventos acima do topo de edifícios, mediante a introdução de mais parâmetros de *input*, como sejam a intensidade do vento, a sua direcção, e até a sua variação temporal.

Uma abordagem intensiva é também recomendada, no sentido de perceber se a utilização de redes neuronais artificiais funciona com eficácia na simulação de velocidades de vento acima de edifícios em modelos à escala tridimensionais.

É recomendado, o treino de redes neuronais, com simulações em túnel de vento em modelos urbanos no sentido em que os resultados obtidos através destes, são de elevada fiabilidade.

Deverá ainda ser feito um estudo intensivo relativamente à simulação numérica a larga escala, no sentido de conseguir reproduzir escoamentos em ambiente urbano, com as mesmas características, nos modelos à escala e em modelos protótipos.

É recomendado, o treino de redes neuronais, com dados de velocidade recolhidos acima dos topos dos edifícios, em situações reais, no sentido de verificar a eficácia do método.

## 6. Bibliografia

- Assimakopoulos, V.D., ApSimon, H.M., Moussiopoulos, N., 2003. Numerical study of atmospheric pollutant dispersion in different two-dimensional street Canyon configurations. *Atmospheric Environment*.
- Ansys Inc., 2007. CFX-11.0 Documentation.
- Amorim, J. H. M. R., 2003. Modelação do escoamento e da dispersão de poluentes atmosféricos em áreas urbanas.
- Batchelor, G.K., *An Introduction to Fluid Dynamics*, Cambridge University Press, 1988.
- Berkowicz, R., 1998. Street scale models. In: Fenger, J., Hertel, O., Palmgren, F. (Eds.), *Urban Air Pollution: European Aspects*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.
- Baik, J.-J., Park, R.-E., Chun, H.-Y., Kim, J.-J., 2000. A laboratory model of urban street- canyon flows. *Journal of Applied Meteorology*.
- Calisto, H. M. F., 2006. Sistema Pericial Destinado à Supervisão de Fornalhas Industriais.
- Chan, A.T., So, E.S.P., Samad, S.C., 2001. Strategic guidelines for street canyon geometry to achieve sustainable street air quality. *Atmospheric Environment*.
- Chan, A.T., Au, W.T.W., So, E.S.P., 2003. Strategic guidelines for street canyon geometry to achieve sustainable street air quality – part II: multiple canopies and canyons. *Atmospheric Environment*.
- Ca, V.T., Asaeda, T., Ito, M., Armfield, S., 1995. Characteristics of wind field in a street Canyon. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*.
- Chang, C.-H., Meroney, R.N., 2003. Concentration and flow distributions in urban street canyons: wind tunnel and computational data. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*.
- Demuth, H., Beale, M., The MathWorks, Inc., 2000. *Neural Network Toolbox User's Guide*.
- Feigenwinter, C., Vogt, R., Parlow, E., 1999. Vertical structure of selected turbulence characteristics above an urban canopy. *Theor. Appl. Clim.*
- Georgakis C., Santamouris M. On the estimation of wind speed in urban canyons for ventilation purposes – Part two: Using data driven techniques to calculate the more probable wind... *Building and Environment* (2007), doi:10.1016/j.buildenv.2007.01.042.

- Georgakis C., Santamouris M. On the estimation of wind speed in urban canyons for ventilation purposes – Part 1: Coupling between the undisturbed wind speed and the canyon ... Building and Environment (2007), doi:10.1016/j.buildenv.2007.01.041.
- Gayev, Y.A., Savory, E., 1999. Influence of street obstructions on flow processes within street canyons. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics.
- He, J., Song, C.C.S., 1997. A numerical study of wind flow around the TTU building and the corner vortex. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics.
- Huang, H., Akutsu, Y., Arai, M., Tamura, M., 2000. A two-dimensional air quality model in an urban street Canyon: evaluation and sensitivity analysis. Atmospheric Environment.
- Isyumov, N., Davenport, A.G., 1975. The ground level wind environment in built-up areas. In: Fourth International Conference on Wind Effects on Tall Buildings and Structures, Heathrow.
- Isyumov, N., Davenport, A.G., 1978. Evaluation of the effects of tall buildings on pedestrian level wind environment. ASCE Annual Convention, Chicago.
- Kim, J.-J., Baik, J.J., 2004. A numerical study of the effects of ambient wind direction on flow and dispersion in urban street canyon using the RNG  $\kappa$ - $\epsilon$  turbulence model. Atmospheric Environment.
- Kim, J.-J., Baik, J.J., 2003. Effects of inflow turbulence intensity on flow and pollutant dispersion in an urban street canyon. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics.
- Kaster-Klein, P., Rotach, M.W., 2004. Mean flow and turbulence characteristics in an urban roughness Sublayer. Boundary Layer Meteorol.
- Kaster-Klein, P., Fedorovich, E., Rotach, M.W., 2001. A wind tunnel study of organized and turbulent air motions in urban street canyons. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics.
- Lee, R.L., Calhoun, R.J., Chan, S.T., Leone, Jr., J., Stevens, D.E., 2001. Modeling of building scale flow and dispersion. In: Proceedings of the Third International Symposium on Environmental Hydraulics, Tempe, AZ, USA.
- Louka, P., Belcher, S.E., Harrison, R.G., 2000. Coupling between air flow in streets and the well-developed boundary layer aloft. Atmospheric Environment.
- Lien F.S., Yee E., Cheng Y., 2004. Simulation of mean flow and turbulence over a 2D building array using high-resolution CFD and a distributed drag force approach. J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.
- Nieuwstadt, F.T.M., Turbulentie, Epsilon uitgaven, Utrecht, 1992.

- Oke, T.R., 1988. Street design and urban canopy layer climate. *Energy and Buildings*.
- Pavageau, M., Shatzmann, M., 1999. Wind tunnel measurements of concentration fluctuations in an urban street canyon. *Atmospheric Environment*.
- Rafailidis, S., 1997. Influence of building areal density and roof shape on the wind characteristics above a town. *Boundary Layer Meteorol.*
- Raw, M.J., Galpin, P.F., Hutchinson, B.R., 1989. A collocated finite-volume method for solving the Navier–Stokes equations for incompressible and compressible flows in turbomachinery: results and applications. *Canadian Aeronautics and Space Journal*.
- Ricciardelli, F., Polimeno, S., 2006. Some characteristics of the wind flow in the lower Urban Boundary Layer. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*.
- Rotach, M.W., 1995. Profiles of turbulence statistics in and above an urban street canyon. *Atmos. Environ.*
- Sander Mertens, *Wind Energy in the Built Environment, Concentrator Effects of Buildings*, 5 September 2006.
- Sathyajith Mathew, *Wind Energy, Fundamentals, Resource Analysis and Economics*, © Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2006.
- Sagrado, A.P.G., van Beeck, J., Rambaud, P., Olivari, D., 2002. Numerical and experimental modeling of pollutant dispersion in a street canyon. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*.
- Sahm, P., Louka, P., Ketzel, M., Guilloteau, E., Sini, J.-F., 2002. Intercomparison of numerical urban dispersion models – Part I: street canyon and single building configurations. *Water, Air, Soil Pollution*.
- Sini, J.-F., Anquetin, S., Mestayer, P.G., 1996. Pollutant dispersion and thermal effects in urban street canyons. *Atmospheric Environment*.
- Soulhac, L., Méjean, P., Perkins, R.J., 1999. Modelling transport and dispersion of pollutants in street canyons. In: *Sixth International Conference on Harmonisation within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes*, INSA de Rouen, France.
- To, A.P., Lam, K.M., 1995. Evaluation of pedestrian level wind environment around a row of tall buildings using a quartile-level wind speed descriptor. *J. Wind Eng. Ind. Aero.*
- Tennekes, H., Lumley, J.L., *A first course in turbulence*, MIT Press, 1972.

- Vardoulakis, S. Fisher, B.E., Pericleous, K., Gonzalez-Flesca, N., 2003. Modelling air quality in street canyons: a review. Atmospheric Environment.
- Venkatram, A., 1980. Estimating the Monin-Obukov length in the stable boundary layer for dispersion calculations. Boundary Layer Meteorol.
- Xie, Z., Castro, P., 2008. Large-eddy simulation for urban micro-meteorolog. Conference of Global Chinese Scholars on Hydrodynamics.
- Wu, H., Stathopoulos, T., 1995. Generic models for pedestrian-level winds in built up regions. J. Wind Eng. Ind. Aero.
- Walton, A., Cheng, A.Y.S., 2002. Large-eddy simulation of pollution dispersion in an urban street canyon—part II: idealised canyon simulation. Atmospheric Environment.
- White F. M., Fluid Mechanics Third Edition, Copyright © 1994, 1986, 1979 by McGraw-Hill, Inc.

### **Endereços na internet**

*url*<sub>1</sub> - [www.eia.doe.gov/oiaf/ieo/download.html](http://www.eia.doe.gov/oiaf/ieo/download.html)

*url*<sub>2</sub> - [www.envirotruth.org](http://www.envirotruth.org)

*url*<sub>3</sub> - [www.peakoil.org](http://www.peakoil.org)

*url*<sub>4</sub> - [www.vrom.nl/milieuhandboek](http://www.vrom.nl/milieuhandboek)

*url*<sub>5</sub> - [www.btscoredatabook.net](http://www.btscoredatabook.net)

*url*<sub>6</sub> - <http://phoenix.phys.clemson.edu/tutorials/stddev/index.html>